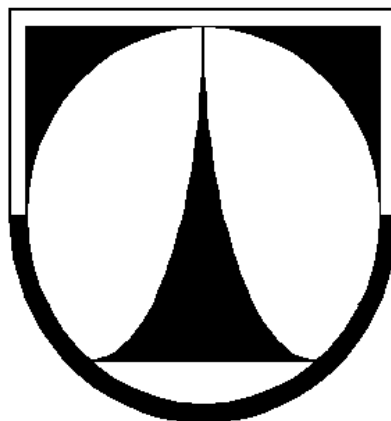


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE



LIBEREC 2008

JITKA FÄRBEROVÁ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

KATEDRA NETKANÝCH TEXTILIÍ

Studijní program: M 3106 Textilní inženýrství
Studijní obor: Netkané textilie

SKLÁDANÉ FILTRY OBSAHUJÍCÍ NANOVLÁKNA
PLEATED FILTERS WITH NANOFIBRES

Autorka: Jitka Färberová

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jakub Hrůza, Ph.D.

Počet stran textu: 61

Počet obrázků: 30

Počet tabulek: 8

Počet příloh: 1

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená *diplomová* práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním *diplomové* práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Beru na vědomí, že si svou diplomovou práci mohu vyzvednout v Univerzitní knihovně TUL po uplynutí pěti let od obhajoby.

V Liberci, dne 12. května 2008

.....

Jitka Färberová

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Jakubovi Hružovi, Ph.D. za pomoc, ochotu a čas, který mi věnoval při zpracování této diplomové práce. Mé další poděkování patří panu Filipu Sanetrníkovi za spolupráci při zvlákňování polyuretanu pro výrobu materiálu na skládané filtry a společnosti Elmarco s.r.o. za poskytnutý materiál.

Anotace

Filtrace je velmi důležitá v mnoha průmyslových odvětvích. S rostoucí lidskou aktivitou je nutné hledat nové způsoby, jak zlepšovat vlastnosti filtrů. Jedním z nich je použití vysoce účinných filtrů s nanovláknennou vrstvou. Technologie výroby nanovláken byla vyvinuta na Technické univerzitě v Liberci na katedře Netkaných textilií.

V rámci této diplomové práce byly připraveny a srovnávány různé skládané filtry s nanovláknennou vrstvou. Všechny filtry byly následně testovány na jejich účinnost a tlakový spád dle normy BS 4400 (testování pomocí aerosolu NaCl).

Annotation

Filtration is very important in many industrial branches. With the growth of human activity it is necessary to look for new possibilities how improve filter properties. One possibility is to use the high efficient pleated filters with nanofibres. The technology of the industrial nanofiber manufacturing was developed at the Technical University of Liberec, Department of nonwovens.

Within the experiment of this diploma thesis were prepared and compared different pleated filters with nanofibres. All filters were tested for filter efficiency and pressure drop according to BS 4400 standard (Method for Sodium Chloride Particulate Test for Respirator Filters).

Klíčová slova:

Nanovlákná

Skládané filtry

HEPA filtry

Filtrační vlastnosti

Key words:

Nanofibres

Pleated filters

HEPA filters

Filter properties

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	10
1. ÚVOD.....	12
2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE	13
2.1 Nanovlákná	13
2.1.1 Materiály vhodné pro výrobu nanovláken	14
2.1.2 Výrobní technologie nanovláken	14
2.1.3 Vlastnosti a výhody nanovláken	19
2.1.4 Použití nanovláken.....	19
2.2 Filtrace a její základní rozdělení	20
2.2.1 Filtrační charakteristiky (proměnné)	22
2.2.2 Filtrační vlastnosti.....	23
2.2.3 Filtrační mechanismy.....	26
2.3 Klasifikace filtrů	29
2.3.1 Skládání filtrů	30
2.3.2 HEPA filtry	31
2.3.3 Účinná plocha skládaného filtru	32
2.3.4 Využití filtrů s nanovláknem	35
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	36
3.1 Postup výroby skládaných filtrů	38
3.2 Testování skládaných filtrů pomocí aerosolu NaCl.....	40
3.2.1 Princip měření vzduchové filtrace aerosolem NaCl	41
4. ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU	43
4.1 Výsledky měření první sady vzorků	43
4.2 Výsledky měření druhé sady vzorků	47
4.3 Výsledky měření třetí sady vzorků	51
4.4 Doplnující experiment zabývající se vlivem vlhkosti na průměry vláken.....	54
5. ZÁVĚR	58
Prameny a literatura	60
Seznam příloh	61

Seznam použitých symbolů a zkratek

μm	mikrometr, 10^{-6} [m]
nm	nanometr, 10^{-9} [m]
λ	vlnová délka světla [nm]
m_s	plošná hmotnost [g.m^{-2}]
M_m	molární hmotnost [g.mol^{-1}]
E	efektivita zachycení částic [%]
G	množství disperzního podílu [g]
Δp	tlakový spád [Pa]
J	jímavost [g]
E_s	střední hodnota efektivity [%]
m	hmotnost [g]
K	koeficient propustnosti [m^2]
Q	průtok vzduchu [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$]
A	plocha filtru [m^2]
R	poloměr vlákna [m]
h	tloušťka filtru [m]
η	dynamická viskozita [Pa.s]
α	úhel, pod kterým nalétává proud vzduchu na plochu skládaného filtru [°]
n	hustota (počet) skladů filtru [m^{-1}]
x	délka poskládaného filtru [m]
y	šířka skládaného filtru [m]
l	skutečná délka filtru [m]
U	napětí [kV]
I	proud [mA]
P	průnik částic vzorkem [%]
t	teplota [°C]
φ	relativní vlhkost [%]
d	vzdálenost elektrod [mm]
v	rychlost [m.min^{-1}]

\bar{x}	průměr tloušťky vláken [μm]
σ	směrodatná odchylka [μm]
x_{\min}	nejmenší hodnota průměru vlákna [μm]
x_{\max}	největší hodnota průměru vlákna [μm]
HEPA filtr	High Efficiency Particulate Air (filtr s vysokou účinností zachytu malých částic ze vzduchu)
ULPA filtr	Ultra Low Penetration Air (filtr s extrémně nízkým průnikem vzduchu)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Státní úřad pro letectví a kosmonautiku)
ČSN EN 779	Evropská norma pro filtraci pomocí hrubých a jemných filtrů tříd G1-G4, F5-F9
EN 1822	Evropská norma pro jemnou filtraci pomocí HEPA filtrů tříd H10-H14 a ULPA filtrů tříd U15-U17
G1 – G4	označení tříd hrubých filtrů
F5 – F9	označení tříd jemných filtrů
H10 – H14	označení tříd HEPA filtrů
U15 – U17	označení tříd ULPA filtrů
NaCl	chlorid sodný
PA6	polyamid (nylon 6)
PP	polypropylen
PU	polyuretan
DMFA	dimethylformamid
TEAB	tetraethylamonium-bromid
H ₂ O	voda

1. ÚVOD

Předmětem této diplomové práce je prostudování teoretických poznatků v oblasti přípravy nanovláknenných materiálů a filtrů s účinnou filtrační plochou upravenou skládáním, a dále pak problematika filtrace, její teoretické principy a způsoby jejího hodnocení. Ohledně nanovláken se práce zaměřuje na různé výrobní metody, vlastnosti a možnosti jejich využití. Z hlediska diplomové práce je důležité zejména použití nanovláken ve skládaných filtrech.

Po experimentální stránce je cílem práce získat skládaný filtr s maximální účinností při relativně nízkém tlakovém spádu, který by bylo možné použít jako tzv. HEPA filtr. Účinnost skládaných filtrů bude zkoumána na různých typech vzorků, odlišujících se hustotou skladů, čili účinnou filtrační plochou.

V rámci provádění experimentů budou použity tři série skládaných vrstev. Dvě vrstvy budou tvořeny papírovým podkladem s polyamidovou nanovláknennou vrstvou, z nichž budou vytvořeny skládané filtry o různé hustotě skladů. Obě vrstvy se budou lišit plošnou hmotností nanovláknenné vrstvy a některými detaily její výroby. Třetí vrstva bude tvořena polypropylenovou podkladovou vrstvou typu spun-bond a polyuretanovou nanovláknennou vrstvou. Výška skladů jednotlivých typů skládaných filtrů zůstane neměnná.

Provedenými experimenty by mělo být dokázáno, že zvětšením účinné filtrační plochy pomocí skládání se dosáhne vyšší efektivity filtru a snížení tlakového spádu.

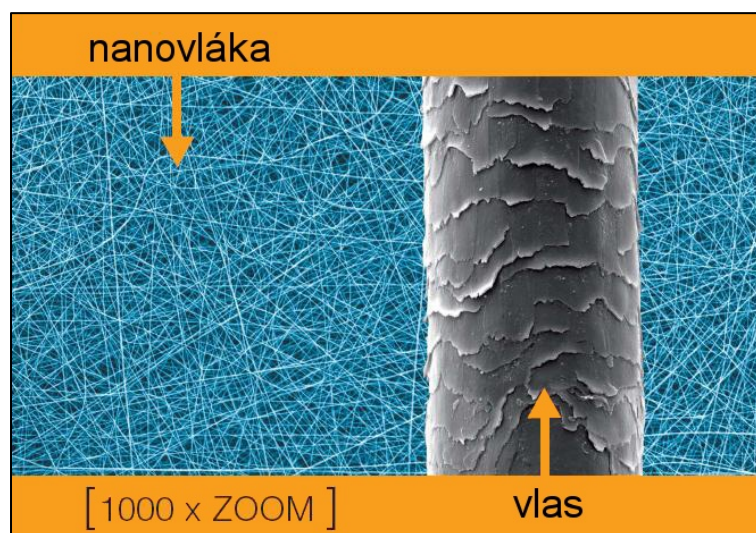
2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

V teoretické části diplomové práce jsou objasněny a podrobně vysvětleny základní pojmy týkající se nanovláken a jednotlivých výrobních technologií. Dále je zde rozebrána problematika filtrace se zaměřením na její charakteristiky, vlastnosti a mechanismy. Samostatná kapitola je věnována skládaným a vysoce účinným filtrům.

2.1 Nanovláknna

Pod pojmem „nanovláknna“ rozumíme vlákna submikronových rozměrů. Jejich průměr činí 50 - 500 nm^{*}, což je méně než vlnová délka světla λ^{**} . Z tohoto důvodu nejsou nanovláknna pod běžnými mikroskopy viditelná a lze je vidět a fotografovat pouze pod elektronovým mikroskopem [1].

Obr. 1 zobrazuje názorné porovnání průměru lidského vlasu a průměru nanovláken pod elektronovým mikroskopem při tisícinásobném zvětšení.



Obr. 1: Porovnání rozměru lidského vlasu a nanovláken [1]

^{*}) Předpona nano vyjadřuje miliardtinu základní jednotky (10^{-9} m)

^{**}) Vlnová délka světla λ (od 360 do 700 [nm] - viditelná část spektra záření)

2.1.1 Materiály vhodné pro výrobu nanovláken

Dosud známe přibližně 50 syntetických a přírodních polymerů elektrostaticky zvláknitelných z roztoku nebo taveniny, které používáme jako výchozí surovinu pro výrobu nanovláken (kompletní seznam viz příloha č. 1). Použitý polymer je nejdůležitějším parametrem, který určuje výsledné vlastnosti vyrobených nanonvláknenných textilií. Neustále se pracuje na vývoji nanovláken z polymerů ve vodném i nevodném roztoku, tavenin polymerů a biologicky rozložitelných polymerů, které najdou své široké uplatnění v oblasti medicíny [2].

2.1.2 Výrobní technologie nanovláken

V současné době existují různé technologie, kterými můžeme z použitého polymeru vyrobit nanovlákná. Mezi nejčastější výrobní metody patří [1]:

- elektrospinning (elektrostatické zvláknování),
- nanospider – modifikovaná metoda elektrospinningu na bázi polymerních roztoků,
- dloužení – podobné výrobě standardních syntetických vláken,
- fázová separace – zvláknování fázovým dělením (rozpuštění, želatinace^{*}, extrakce^{**}, zmrazení a sušení),
- samo-organizování – jednotlivé funkční mechanismy se samy organizují do požadovaných vzorců a funkcí,
- podložková syntéza – tímto způsobem se vyrábí duté vlákno, např. uhlíkové nanotrubičky.

Nejllepších výsledků, pokud jde o produktivitu výroby a o kvalitu získaných nanovláken, dosáhneme pomocí elektrospinningu a metody nanospider. Obě jmenované metody budou níže podrobněji popsány, a to

^{*}) Želatinace je přeměna polymerního solu v gel

^{**}) Extrakce je čistící a dělicí operace, při které přechází složka ze směsi látek v kapalně či tuhé fázi do jiné kapalně fáze – rozpouštědla.

nejen z důvodu, že jsou nejúčinnějšími technologiemi, ale i proto, že metoda nanospider byla při experimentech v rámci této práce použita při výrobě materiálu, z něhož byly poté zhotoveny skládané filtry (viz kapitola 2.3.1).

Ostatní uvedené výrobní technologie jsou zmíněny pouze pro úplnost a autorka se jimi dále nezabývá, neboť se jedná o postupy málo produktivní, s větším množstvím kvalitativních nedostatků.

Elektrospinning

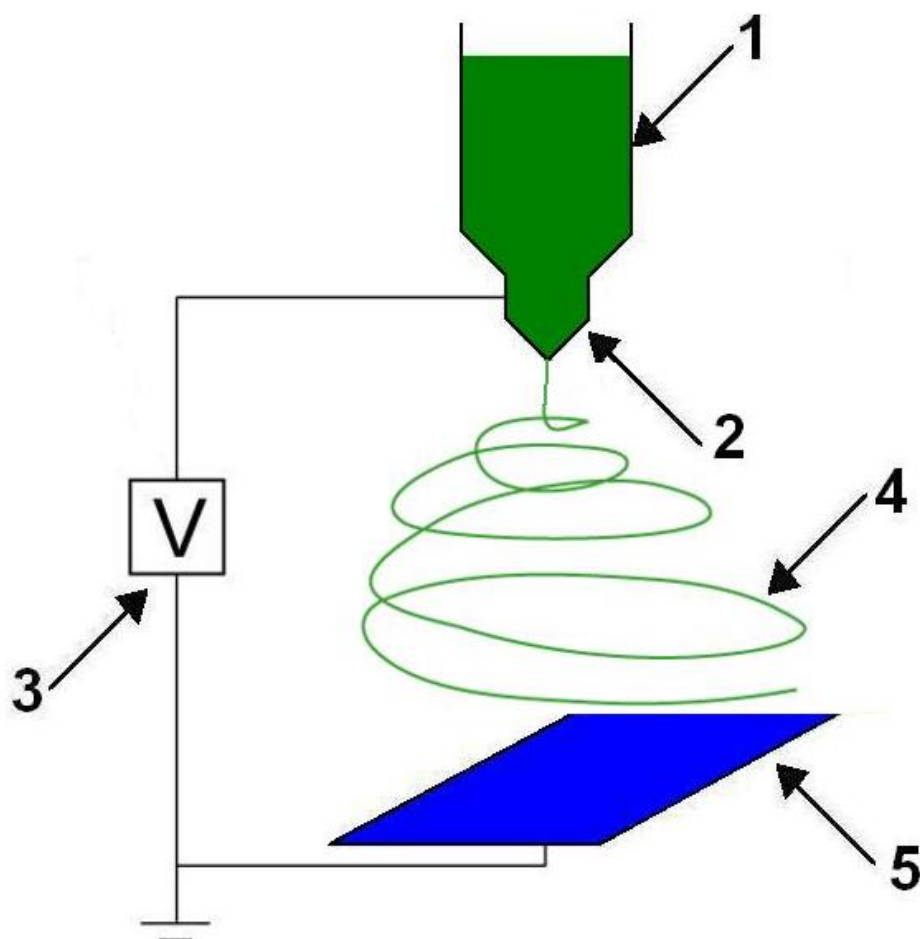
Elektrospinning neboli elektrostatické zvlákňování je proces využívající elektrostatických sil k utváření jemných vláken z polymerního roztoku nebo polymerní taveniny [2].

Technologie elektrostatického zvlákňování nejčastěji využívá stejnosměrného elektrostatického pole o vysoké intenzitě. Toto pole je tvořeno napětím mezi elektrodami, z nichž jedna je v podobě úzké kapiláry a druhá, zpravidla nazývaná kolektorem, může být např. v podobě disku, který je plochou stranou postavený proti vrcholu kapiláry.

Vlastní proces elektrospinningu spočívá ve vytlačování polymerního roztoku z kapiláry, jež je současně nabitá a přenáší náboj do roztoku polymeru. Na polymerní roztok vytlačený do ústí kapiláry působí síly, které zapříčiní energické vytažení hmoty roztoku směrem od kapiláry ke kolektoru. Následně se mezi oběmi elektrodami vytvoří tzv. Taylorův kužel, což je mikroskopický prostorový útvar, který je výslednicí coulombovských, viskozitních, mezipovrchových a popř. odstředivých sil vyskytujících se na vrcholu trysky. Vláknem vytažené z kapiláry se pak na cestě ke kolektoru dlouží a navíc se ještě štěpí, přičemž ve velké míře narůstá měrný povrch vláken. Během dloužení a štěpení vlákna zároveň dochází k odpařování rozpouštědla obsaženého v polymerním roztoku. Při vhodném prostorovém uspořádání trysky a kolektoru a správné volbě rozpouštědel pak dopadají na kolektor již suchá vlákna submikronových průměrů. Náboj, který zvlákňovaná hmota

nese, a který má stejnou polaritu jako náboj kapiláry, je poté vybit na uzemněném kolektoru [1].

Na obr. 2 je pro bližší představu výše popsaného principu elektrospinningu znázorněno jednoduché schéma celého procesu výroby nanovláken.



Obr. 2: Schéma elektrostatického zvlákňování;

Legenda: 1 - roztok polymeru,

2 - tryska (kapilára),

3 - zdroj vysokého napětí,

4 - Taylorův kužel,

5 - uzemněná protielektroda (kolektor)

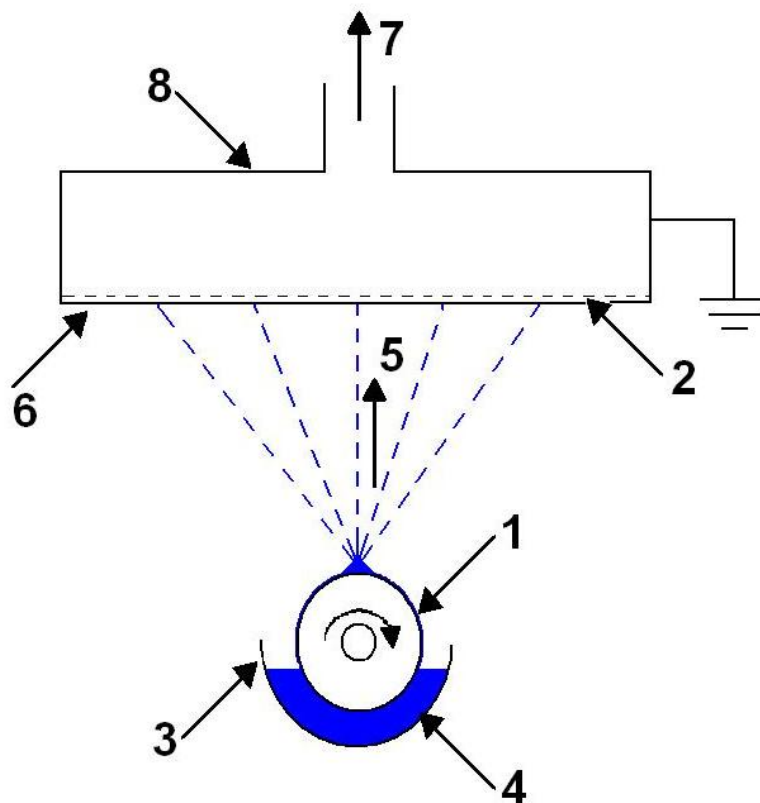
Nanospider

Nanospider je unikátní technologie výroby nanovláken vyvinutá a patentována ve spolupráci Technické Univerzity v Liberci a společnosti Elmarco s.r.o. Podstata této technologie spočívá v modifikaci metody elektrospinningu na bázi polymerních roztoků.

Nanospider je založen na objevu, že je možné vytvořit Taylorův kužel a následný proud polymerní hmoty nejen z vrcholu kapiláry, ale také z tenké vrstvy roztoku polymeru. Na rozdíl od ostatních metod sloužících k výrobě nanovláken nepoužívá nanospider žádných kapilár pro tvorbu vláken, ale válec částečně ponořený v roztoku polymeru. Válec se otáčí kolem své osy a přitom se na celém jeho povrchu postupně vytváří tenký film roztoku polymeru. V horní úvratí rotačního pohybu válce, což představuje místo s nejnižší vzdáleností od kolektoru – protielektrody, se v důsledku maximální intenzity elektrického pole začnou vytvářet mnohačetná ohniska Taylorových kuželů, která poté vyústí v proces zvlákňování, jak bylo popsáno u procesu elektorspinningu. Taylorovy kužele a následné proudy polymerní hmoty jsou vytvářeny v husté síti pokrývající horní část válce. Tím je dosaženo vysoké výrobní kapacity zvlákňovací hlavy nanospideru. Proudý roztoku polymeru jsou tak zbaveny rozpouštědla a stávají se pevnými nanovlákný těsně před tím, než dosáhnou kolektoru [3].

Zásadními přednostmi této technologie, ve srovnání s výrobním procesem elektrospinningu, jsou především možnost výroby nanovláknenných textilií v průmyslovém měřítku, vysoká kvalita získaného nanovláknenného materiálu, snadná obsluha, údržba i čištění výrobního zařízení a velká výrobní kapacita [1].

Obr. 3 ilustruje na schématu princip výroby nanovláken za použití technologie nanospider.



Obr. 3: Schéma zvlákňování pomocí technologie nanospider;

Legenda: 1 - nabitá elektroda,

2 - uzemněná protielektroda,

3 - zásobovací vanička,

4 - roztok polymeru,

5 - směr tvorby nanovláken,

6 - podkladová textilie,

7 - odsávání vzduchu,

8 - sběrná clona s uzemněním.

2.1.3 Vlastnosti a výhody nanovláken

Nanovlákná se vyznačují vynikajícími vlastnostmi, pro něž bývají označována jako materiály třetího tisíciletí. Mezi nejdůležitější vlastnosti a výhody řadíme [2]:

- velký měrný povrch (tisícinásobně větší povrchová plocha než u mikrovlákná),
- relativně vysoká prodyšnost (ve srovnání s membránami),
- malá velikost pórů (nepronikne kapka vody, ale ani bakterie nebo vir),
- průměr vláken do 1000 nm,
- plošná hmotnost $m_s = 0,5 - 5 \text{ g.m}^{-2}$,
- transparentnost – průměry nanovláken jsou výrazně menší než vlnová délka světla, což činí nanovlákná neviditelná pod optickým mikroskopem,
- vynikající tuhost a houževnatost,
- výborné mechanické vlastnosti v poměru k jejich váze.

2.1.4 Použití nanovláken

Nanovlákná a produkty z nich vytvořené je možné použít již nyní v mnoha rozdílných oborech lidské činnosti a jejich využitelnost neustále stoupá.

Jednou z možností je výrazné zlepšení filtrů. Nanovláknenné filtry mohou být použity jako cigaretové filtry, filtry v automobilech (vzduch i paliva), vysoce účinné HEPA filtry, respirátory a jiné. V této práci je kladen důraz na skládané HEPA filtry a kabinové filtry v automobilech.

Karbonová nanovlákná představují materiály s nepřekonanou pevností, a jsou proto využívána jako součásti pro výrobu ochranných oděvů pro hasiče, ale také neprůstřelných oděvů pro vojáky, kde mohou svými kvalitními vlastnostmi nahradit dosavadní používané látky.

Neméně důležité jsou rovněž možnosti nabízející se v biomedicině, především v oblasti „náhradních dílů“ pro lidské orgány. Struktura nanovláken vyrobených metodou nanospider se podobá struktuře lidské tkáně, proto lze nanovláknata využít jako obvazový materiál ke krytí ran nebo pro rekonstrukci kůže, kostí, cév, svalů i nervové tkáně.

Široké možnosti pro nanovláknata představuje rovněž kosmetický průmysl. Do budoucna se počítá s nanovláknaty dokonce při výrobě tzv. solárních plachet k pohonu vesmírných plavidel [3].

2.2 Filtrace a její základní rozdělení

Filtrace je metoda dělení pevné nebo kapalné fáze od disperzního systému (plyn nebo kapalina) na porézní přepážce, neboli filtru. Disperzní systém filtrem protéká, zatímco pevné částice filtr zachycuje.

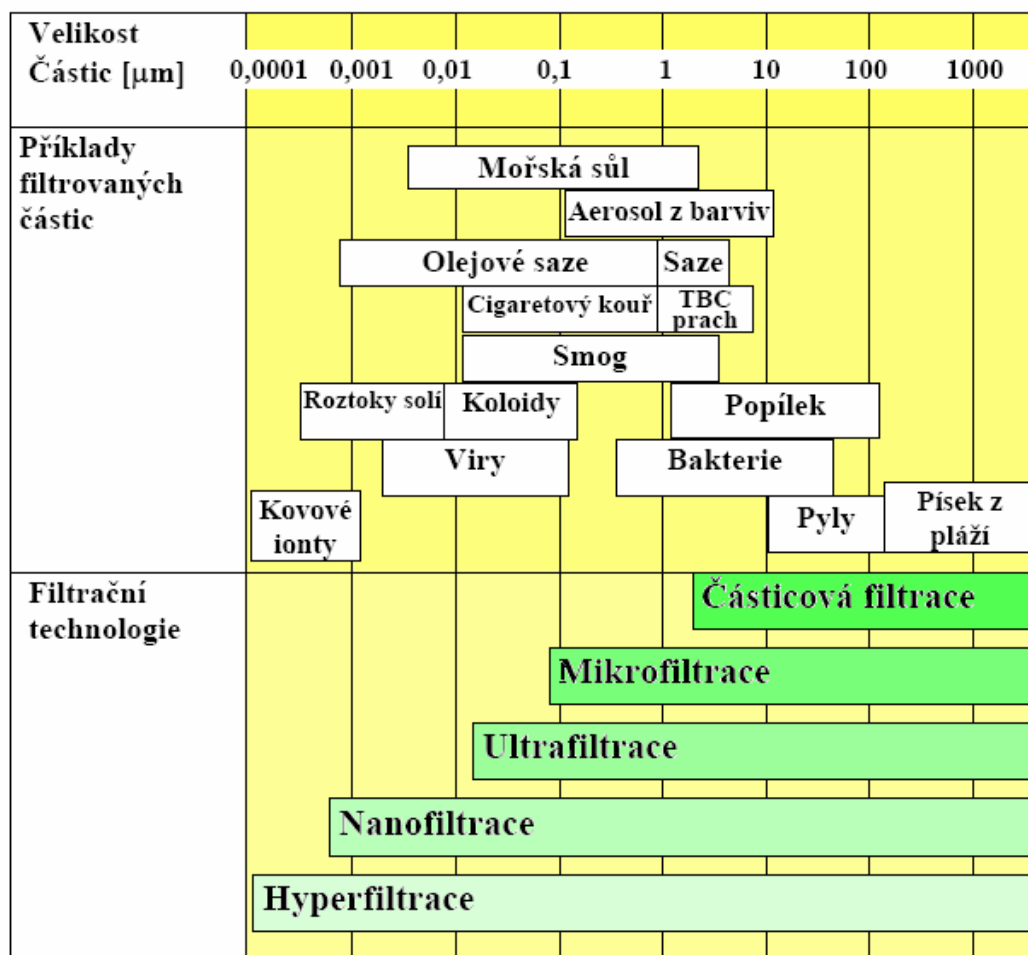
Filtraci je možno dělit na několik typů v závislosti na různých kritériích. Podle disperzního prostředí rozlišujeme filtraci vzduchovou nebo filtraci kapalinovou.

Podle velikosti filtrovaných částic (viz obr. 4) rozeznáváme filtraci částicovou, mikrofiltraci, ultrafiltraci, nanofiltraci a hyperfiltraci. U částicové filtrace je velikost částic přibližně 1 μm a často jsou viditelné pouhým okem (např. kvasinky, mouka, krvinky, sraženiny atd.). Velikost částic u mikrofiltraci se pohybuje v rozmezí od 0,1 μm do 1 μm (např. pigmenty, bakterie, asbest atd.). Ultrafiltrace se vyznačuje velikostí částic přibližně od 3 nm do 0,1 μm (např. bílkoviny, viry, želatina atd.). Pro nanofiltraci se udává spíše rozmezí molárních hmotností M_m filtrované látky a to přibližně od 200 g/mol* do 15 000 g/mol, což odpovídá přibližně velikosti částic od 1 nm do 10 nm (např. barviva, pesticidy, herbicidy, cukry atd.). V případě hyperfiltrace

*) Mol je základní jednotka látkového množství. 1 mol libovolné látky obsahuje stejný počet částic jako je obsaženo atomů ve 12 g izotopu uhlíku ^{12}C . Tento počet udává Avogadrova konstanta, jejíž hodnota je přibližně $6,022 \cdot 10^{23}$. Mol je jedna ze sedmi základních jednotek soustavy SI.

se hovoří spíše o difúzní dialýze (dělení iontů i nenabitých částic) či elektrodialýze (dělení aniontů a kationtů).

Obr. 4 přehledně zobrazuje výše uvedené rozdělení filtrace podle velikosti filtrovaných částic.



Obr. 4: Typy filtrace podle velikosti filtrovaných částic [4]

Dále rozlišujeme filtrace podle způsobu zachytávání částic, a to na filtraci povrchovou, při které se částice zachycují na povrchu filtru a vytvářejí tak vrstvu zvanou filtrační koláč, a na filtraci hloubkovou, při které částice procházejí porózním prostředím filtru a zachycují se v něm (pískové filtry v čističkách odpadních vod). Tloušťka filtru používaného pro hloubkovou filtraci bývá mnohem větší než je tloušťka filtru u povrchové filtrace [4,5].

2.2.1 Filtrační charakteristiky (proměnné)

Filtrační proměnné veličiny jsou chápány jako jednotlivé vstupní parametry celkového procesu filtrace. Člení se dále na parametry filtru, parametry filtračního procesu a parametry filtrovaných částic [6]:

Do parametrů filtru patří:

- filtrační plocha,
- tloušťka filtru (platí pravidlo, že čím je tloušťka filtru větší, tím více částic je filtr schopen zachytit, zvyšuje se efektivita filtru, aniž by se výrazně zvýšil tlakový spád),
- hustota a povrchová hustota filtru (pro efektivitu filtru je nejlepší větší hustota na povrchu filtru, což ovšem na druhou stranu zvyšuje tlakový spád),
- hmotová stejnoměrnost filtru,
- materiál, z něhož je filtr vyroben (přírodní i syntetická vlákna),
 - povrchové interakce mezi filtračním materiálem a částicemi,
 - mechanické vlastnosti (pevnost, tažnost, atd.),
 - elektrické vlastnosti,
 - odolnost vůči okolním vlivům (teplo, rozpouštědla, atd.),
- parametry vláken,
 - jemnost (čím jemnější jsou vlákna, tím vyšší je specifický měrný povrch vláken a efektivita filtru),
 - tvar průřezu vláken,
 - preparace na povrchu vláken (mohou nastat interakce mezi vlákny a částicemi, např. při použití lubrikací),
 - mechanické vlastnosti,
- struktura filtru,
 - gradient hustoty (u nečistitelných filtrů je hustší zadní část, u čistitelných je tomu naopak - zpětným tlakem vzduchu dojde k čištění),
 - orientace vláken.

Parametry filtračního procesu jsou rychlost proudění částic na náletovou stranu, teplota, tlak a vlhkost a viskozita proudícího média.

Mezi parametry filtrovaných částic řadíme velikost částic, rozložení částic, koncentraci částic, tvar a povrch částic, hustotu částic (obecně jsou filtrem nejhůře zachytávané částice o velikosti 0,1 - 0,4 μm, jejichž setrvačnost je nižší, vzduch je nese a vznášejí se; nejlépe jsou zachytávané částice o velikosti přibližně 0,01 μm – uplatní se zde tzv. Brownův pohyb*) a elektrické vlastnosti [8].

2.2.2 Filtrační vlastnosti

Odlišně od filtračních charakteristik jako vstupních parametrů představují filtrační vlastnosti výstupní veličiny v procesu filtrace. Jednotlivé vlastnosti se v průběhu filtračního procesu mění. To je způsobeno postupným zanášením mezivlákněných prostor filtrovanými částicemi. Základními filtračními vlastnostmi jsou [5]:

Efektivita filtru (účinnost), která představuje poměrné množství částic, které je filtr schopen zachytit. Je dána vztahem:

$$E = \left(1 - \frac{G_1}{G_2}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.1),$$

kde G_1 je množství nezachyceného disperzního podílu za filtrem [g], G_2 je celkové množství disperzního podílu [g] a podíl $\frac{G_1}{G_2}$ je značen jako průnik P . V průběhu procesu filtrace se efektivita filtru výrazně mění. To je způsobeno ucpáváním pórů zachycenými částicemi. Na

*) Brownův pohyb je náhodný pohyb mikroskopických částic v kapalném nebo plynném médiu. Molekuly v roztoku se vlivem tepelného pohybu neustále srážejí, přičemž směr a síla těchto srážek jsou náhodné, díky čemuž je i okamžitá poloha částice náhodná.

povrchu filtru poté z takto zachycených částic vznikají útvary zvané „dendrity“. Efektivita filtru tím klesá.

Tlakový spád vyjadřující odpor filtru vůči toku. S klesajícím tlakovým spádem roste efektivita filtru. Tlakový spád je určen rovnicí:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad [Pa] \quad (2.2),$$

kde p_1 a p_2 jsou tlaky filtrovaného média před a za filtrem udávané v pascálech.

Životnost filtru, čili doba jeho použitelnosti až do doby, kdy se již použít nedá a je třeba jej vyměnit. Z tohoto hlediska rozlišujeme filtry jednorázové a filtry čistitelné. U jednorázových filtrů je životnost ovlivněna koncentrací částic ve vzduchu a množstvím částic, které je filtr schopen pojmout do doby, než je tlakový spád příliš vysoký. Životnost čistitelných filtrů je ovlivněna počtem čištění a intervaly mezi jednotlivými čištěními a končí v okamžiku, kdy pevnost filtru není vhodná pro filtrační proces. Životnost se definuje pomocí jímavosti dle normy EN 779.

Jímavost, neboli množství prachu, které je filtr schopen zachytit do okamžiku dosažení zadaného tlakového spádu. Je vyjádřena takto:

$$J = E_s \cdot m \quad [g] \quad (2.3),$$

kde E_s je střední hodnota efektivit [%] a m je celkové množství prachu [g] naneseného na filtr do okamžiku překročení mezního tlakového spádu. Jímavost je udávána v gramech.

Prodyšnost je vlastnost opačná než je tlakový spád. Definuje schopnost materiálu propouštět vzduch (popř. vodu). Čím vyšší je

prodyšnost, tím nižší je tlakový spád a naopak. Pro výpočet prodyšnosti můžeme použít D'Arcyho zákon:

$$K = \frac{Q}{\Delta p \cdot A} \quad (2.4),$$

kde K je koeficient propustnosti (prodyšnosti) [m^2], Q je průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], Δp je tlakový spád [Pa] a A je plocha průřezu filtru kolmo ke směru toku [m^2].

Velikost pórů a porózyta určuje procento vzduchu ve filtru. Tato vlastnost je důležitá pouze u plošné filtrace.

Odolnost vůči bakteriím

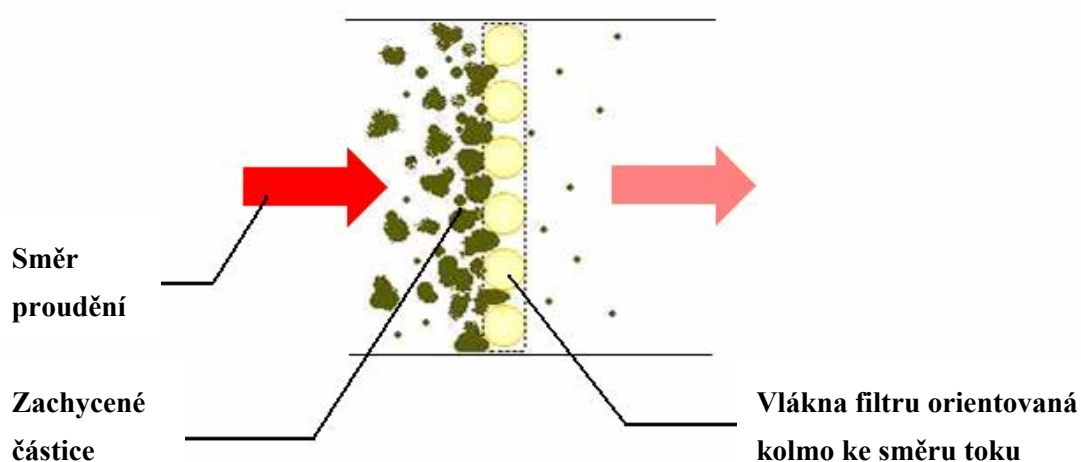
Bakterie zachycené filtrem jsou stále aktivní a mohou časem prorůstat jeho strukturou a následně být uvolněny do čištěného prostoru. Proto je nutno při procesu filtrace bakterií řešit nejen jejich záchyt, ale i schopnost filtru bakterie likvidovat, nebo alespoň zastavit jejich růst.

Odolnost filtru proti působícím vlivům, které mohou být mechanické, chemické nebo teplotní.

2.2.3 Filtrační mechanismy

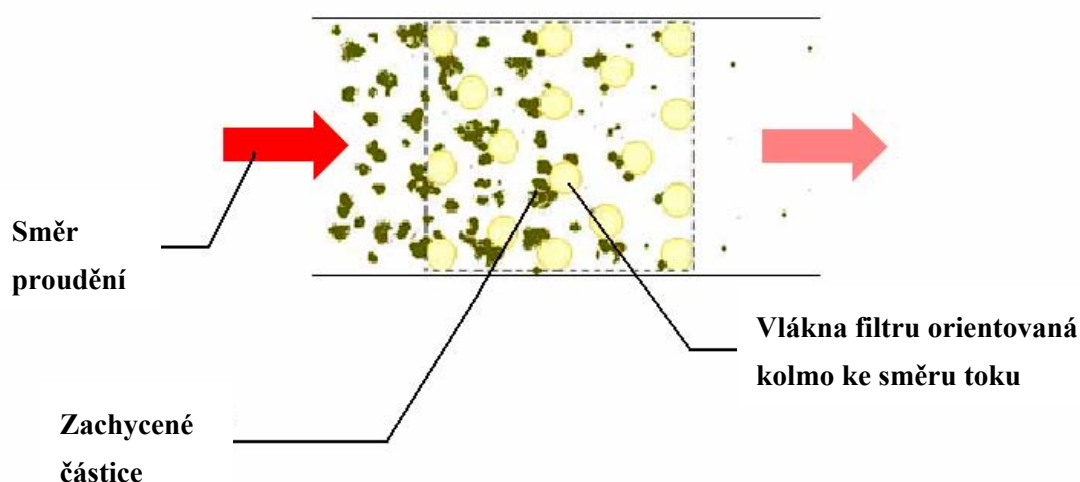
Filtrační mechanismy určují vztah mezi vstupními a výstupními proměnnými v procesu filtrace. Jak již bylo výše zmíněno, za vstupní proměnné považujeme filtrační charakteristiky a za výstupní proměnné považujeme filtrační vlastnosti. Pro určení vztahu mezi vstupními a výstupními proměnnými je důležité znát mechanismy záchytu částic na povrchu vlákna filtru. Z hlediska těchto mechanismů je možné filtraci dělit na plošnou a hloubkovou.

V případě plošné filtrace je mechanismus záchytu částic na povrchu vlákna filtru velmi jednoduchý. Filtrem je mechanicky zachycena každá částice, která je větší než prostor mezi vlákny. Efektivita záchytu je tudíž jednoznačně dána distribucí velikostí pórů textilie (viz obr. 5) [6].



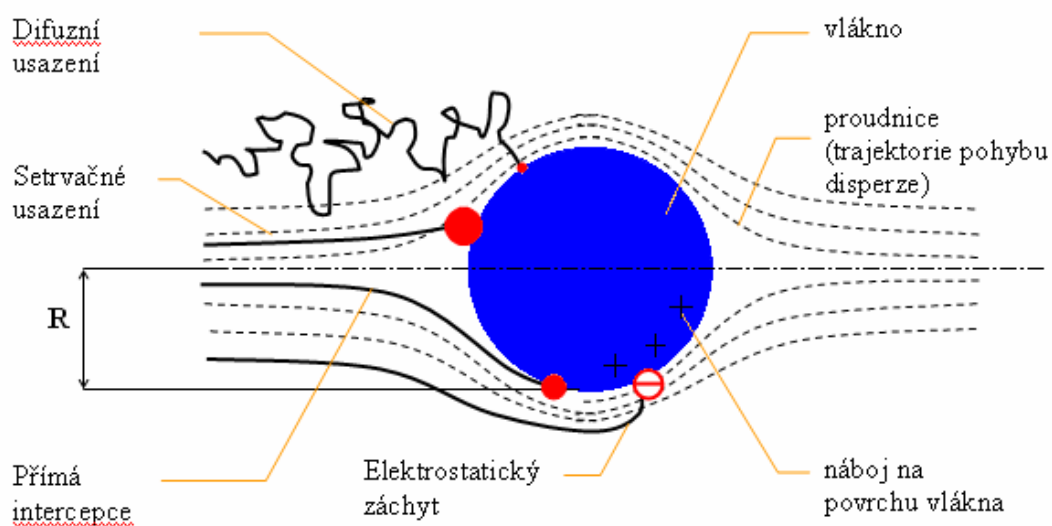
Obr. 5: Schématicky znázorněný pohled plošné filtrace [5]

Hloubkovou filtraci charakterizuje skutečnost, že velikost zachytávaných částic je řádově menší, než velikost prostorů mezi vlákny (viz obr. 6). Zde se uplatňuje více filtračních mechanismů najednou [6].



Obr. 6: Schématicky znázorněný pohled hloubkové filtrace [5]

Uvedené mechanismy vyjadřují modelovou představu přiblížení částice k povrchu vlákna. Pro tyto úvahy platí předpoklad, že po kontaktu s vláknem je částice zachycena pomocí Van der Waalsových sil, elektrostatických sil a sil vyvolaných povrchovým napětím. Jak je vidět na obr. 7, můžeme filtrační mechanismy hloubkové filtrace třídit následujícím způsobem:



Obr. 7: Schematické vyjádření filtračních mechanismů hloubkové filtrace [6]

Difuzní usazení částic na povrchu vláken znamená, že malé částice v důsledku Brownova pohybu nesledují zakřivení proudnic a difundují k povrchu vláken. Význam difúzního usazení roste s klesající rychlostí proudění filtrované disperze.

Při setrvačném usazení nesledují částice charakterizované velkou rychlostí a hmotností zakřivení proudnic a narážejí na povrch vláken podobně jako projektily.

Dalším způsobem zachytu částic je přímá intercepce (přímý záchyt). Princip mechanismu přímého zachytu vychází z představy částic pohybujících se shodně s tokem disperzního prostředí. Částice je zachycena, jakmile se přiblíží k povrchu vlákna na vzdálenost rovnou jejímu poloměru R .

Elektrostatický záchyt je charakterizován tím, že v důsledku působení přitažlivých sil daných nábojem na povrchu vlákna a zachytávané částici je trajektorie pohybu částice zakřivena směrem k vláknu [11].

2.3 Klasifikace filtrů

Filtry klasifikujeme podle filtračních vlastností (normy), podle typu filtru a podle tvaru filtru [4,5].

Podle evropské normy ČSN EN 779 a EN 1822 lze třídit filtry na hrubé, jemné a vysoce účinné (viz tab. 1).

Typ filtru	Třída filtru	Testovací metoda	Efektivita filtru [%]
Hrubé filtry	G1	test syntetickým prachem, EN 779	do 65
	G2		65 – 80
	G3		80 – 90
	G4		přes 90
Jemné filtry	F5	test olejovým aerosolem, test aerosolem NaCl, EN 779	40 – 60
	F6		60 – 80
	F7		80 – 90
	F8		90 – 95
	F9		přes 95
HEPA[*] filtry	H10	test olejovým aerosolem, test aerosolem NaCl, EN 1822	přes 85
	H11		přes 95
	H12		přes 99,5
	H13		přes 99,95
	H14		přes 99,995
ULPA^{**} filtry	U15		přes 99,9995
	U16		přes 99,99995
	U17		přes 99,999995

Tab 1: Rozdělení filtrů podle evropských norem ČSN EN 779 a EN 1822 [5]

^{*}) HEPA (High Efficiency Particulate Air) filtry jsou filtry s vysokou účinností zachytu malých částic ze vzduchu

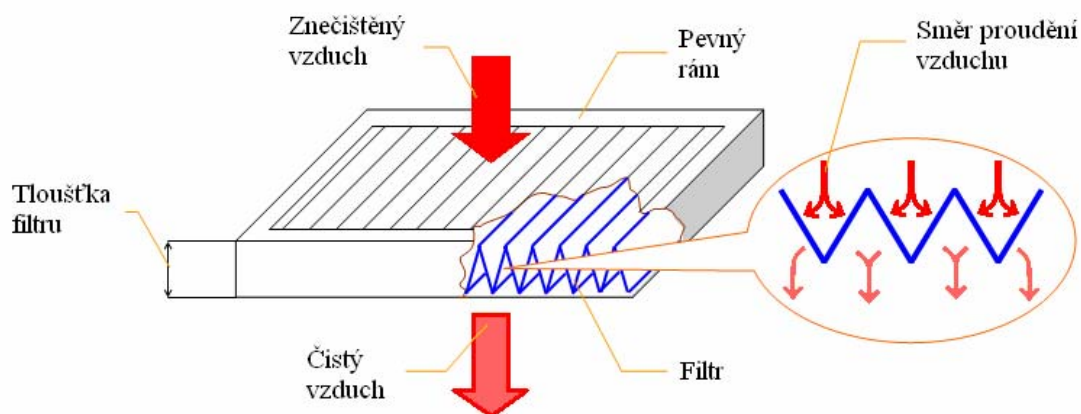
^{**}) ULPA (Ultra Low Penetration Air) filtry jsou filtry s extrémně nízkým průnikem vzduchu

Podle typu filtrace členíme filtry na plošné a hloubkové. Podle tvaru filtru je možné filtry dělit na ploché, skládané, kapsové, svíčkové a hadicové.

Tato práce je zaměřena pouze na plošnou filtraci pomocí skládaných filtrů s nanovláknennou vrstvou, proto bude dále podrobněji rozebráno právě téma skládaných filtrů a v jejich rámci zejména téma filtrů s vysokou účinností.

2.3.1 Skládané filtry

Skládanými filtry se rozumí materiál poskládaný do tvaru harmoniky a zpevněný rámem (viz obr. 8). Použití skládaných filtrů je jednou z metod zlepšování filtračních charakteristik. Tímto způsobem jsou v praxi upravovány zejména vysoce účinné filtry (tzv. HEPA filtry) z důvodu jejich malé prodyšnosti. Výhodou skládaného filtru je několikanásobné zvýšení filtrační plochy, což vede při konstantním průtoku k výraznému snížení tlakového spádu a může vést i ke zvýšení efektivity filtrace z důvodu snížení rychlosti toku před filtrem. Vzhledem k tomu, že nanovláknenné vrstvy mají obecně obdobné vlastnosti jako vrstvy používané pro vysoce účinné filtry (vysoká efektivita, vysoký tlakový spád), jeví se tato metoda vhodnou i pro ně [7].



Obr. 8: Konstrukce skládaného filtru s detailním rozkreslením proudění filtrované disperze [5]

2.3.2 HEPA filtry

Nejdokonalejší filtry pro čištění vzduchu jsou HEPA filtry. Podle evropské normy EN 1822 je lze definovat jako filtry s účinností vyšší než 85 % pro velikost částic s nejvyšším průnikem* (rozsah 0,15 μm až 0,60 μm). Díky takto vysoké účinnosti dokáží zbavit ovzduší jemného prachu, pylu, tabákového kouře, zvířecích chlupů, bakterií, virů a spór plísní (viz obr. 9).

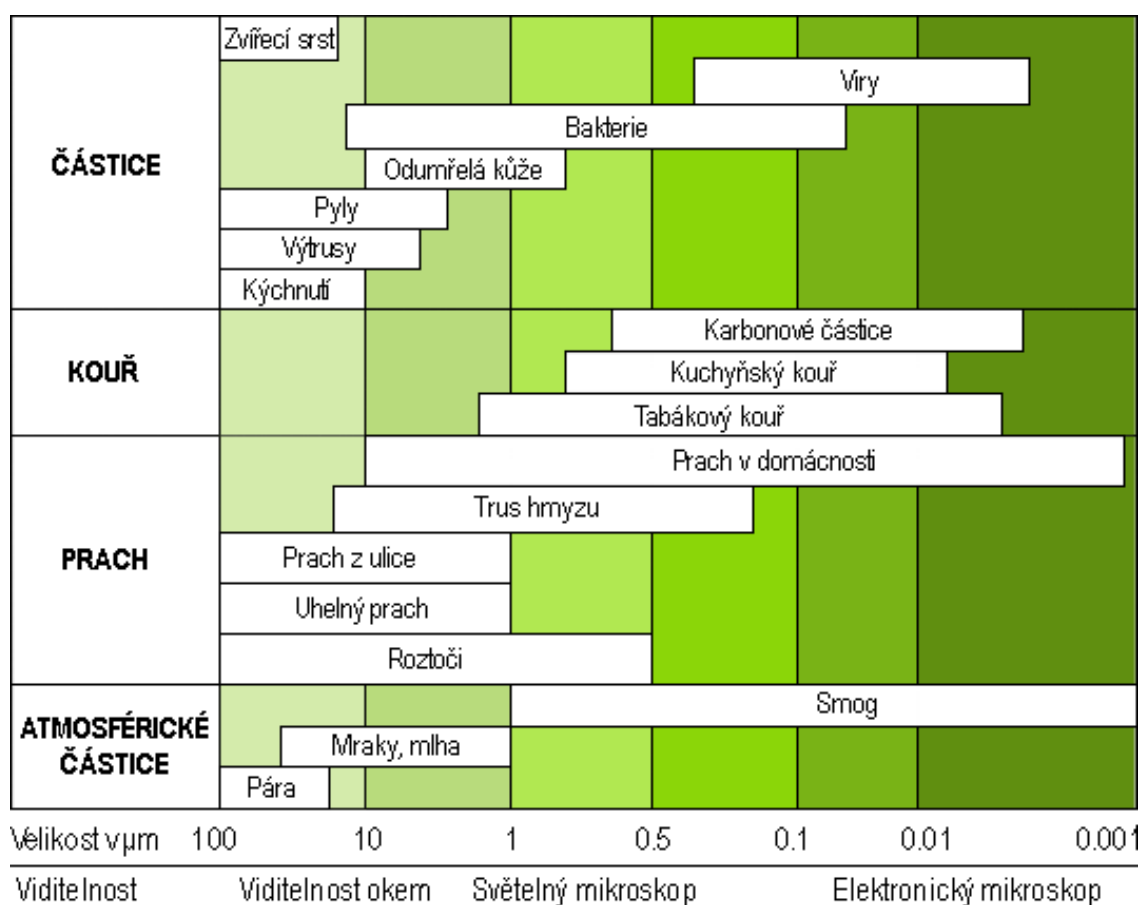
HEPA filtry byly vyvinuty v NASA** za účelem ochrany osob před působením radioaktivních částic. Speciální složení filtrů zajišťuje nejen vynikající účinnost, ale i dlouhou životnost. Ani při jejich úplném zanesení nedojde k úniku kontaminovaných částic.

Nanovlákná se vyznačují vlastnostmi, které je přímo předurčují pro vysoce účinnou filtraci vzduchu, neboť z každých 10 000 částic od velikosti 0,3 μm propustí pouze tři částice. V procentuálním vyjádření se hovoří o účinnosti 99,97 %. Nanovláknenný materiál má velký měrný povrch při nízké hmotnosti, malé průměry vláken a je vysoce porézní. Velikost pórů se pohybuje v řádu desítek až stovek nanometrů, což zabezpečuje neprůchodnost mikročástic či mikroorganismů, dokonce i virů. Malé průměry vláken zajišťují vysokou filtrační účinnost i pro částice menší, než je velikost pórů, ale současně je dosahováno i relativně nízkého tlakového spádu. Nízká váha koresponduje s úspornou výrobou díky materiálovým úsporám.

Základem HEPA filtru je nejčastěji harmonikově složená textilie s velkým povrchem. Právě absorpční plocha (účinná plocha filtru) je u těchto filtrů velmi důležitá. Účinná plocha filtru je skutečná plocha filtru vztažená na 1 m^2 [7].

*) Částice s nejvyšším průnikem mají definovanou velikost, při které se dosáhne maximálního činitele prostupu.

**) NASA (National Aeronautics and Space Administration) - Státní úřad pro letectví a kosmonautiku



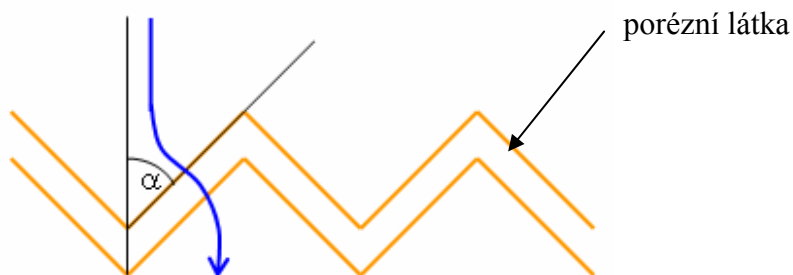
Obr. 9: Porovnání velikostí různých nečistot a jejich viditelnost [7]

2.3.3 Účinná plocha skládaného filtru

Plocha filtru A je velmi důležitým parametrem ovlivňujícím výsledné filtrační vlastnosti. Experimenty prováděné v rámci této práce zkoumají teoretický předpoklad, že větší filtrační plocha by měla zvýšit efektivitu filtru, jeho životnost a zároveň snížit tlakový spád. Vztah mezi filtrační plochou a tlakovým spádem je vyjádřen D'Arcyho rovnicí:

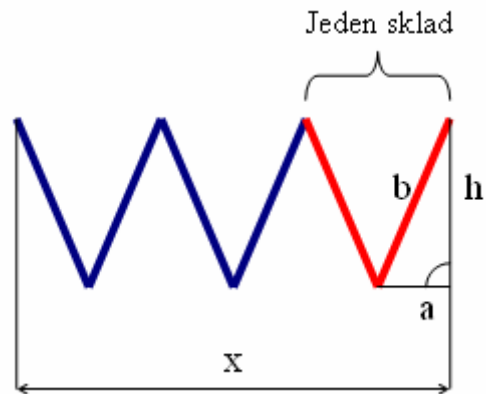
$$Q = \frac{A \cdot k \cdot \Delta p}{h \cdot \eta} \quad (2.5),$$

kde Q je průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], Δp je tlakový spád [Pa], A je plocha filtru [m^2], h je tloušťka filtru [m], η je dynamická viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] a k je koeficient propustnosti filtru [m^2]. Z D'Arcyho rovnice vyplývá, že vztah mezi tlakovým spádem a filtrační plochou je lineární pro stejný materiál se stejnou tloušťkou při konstantním průtoku. Struktura plošného filtru se velmi liší od struktury skládaného filtru, neboť skládáním se výrazně mění jeho filtrační plocha. V průběhu filtrace nenalétává proud vzduchu na plochu skládaného filtru kolmo, jako je tomu u plošných filtrů, nýbrž pod úhlem α (viz obr. 10), který se zmenšuje s rostoucím se počtem skladů. Filtrovaná disperze se tak pohybuje cestou nejmenšího odporu, což znamená, že se snaží orientovat kolmo k ploše jednotlivých skladů filtru tak, aby vzdálenost, kterou musí urazit v prostoru vyplněném porézní látkou, byla co nejkratší. Se zvyšující se hustotou skladů proto dochází k poklesu koeficientu propustnosti filtru [8].



Obr. 10: Trajektorie filtrované disperze proudící skládaným filtrem [9]

Hustota skladů n vyjadřuje počet skladů na jeden metr délky skládaného filtru. Na základě konkrétního počtu skladů je možné vypočítat skutečnou plochu skládaného filtru. Podle schématu na obr. 11, jenž znázorňuje průřez skládaným filtrem, je možné snadno odvodit vztah pro výpočet skutečné délky skládaného filtru a následně vztah pro výpočet skutečné neboli účinné plochy filtru [9].



Obr. 11: Schéma skládaného filtru sloužící k výpočtu skutečné délky filtru [9]

Z pravoúhlého trojúhelníku abh na výše uvedeném obr. 11 lze pomocí vztahu 2.6 vypočítat délku strany b :

$$b = \sqrt{h^2 + \frac{x^2}{4n^2}} \quad (2.6),$$

kde h je tloušťka skládaného filtru [m], x je délka poskládaného filtru [m] a n je počet skladů [m^{-1}]. Skutečná délka skládaného filtru je rovna $2 \cdot b \cdot n$, a proto je možné použít následující upravený vztah:

$$l = n \sqrt{4h^2 + \frac{x^2}{n^2}} \quad (2.7),$$

kde l je skutečná délka filtru [m], n je počet skladů [m^{-1}], h je tloušťka filtru [m] a x je délka poskládaného filtru [m]. Skutečná (účinná) plocha filtru je pak dána vztahem:

$$A = y \cdot n \sqrt{4h^2 + \frac{x^2}{n^2}} \quad (2.8),$$

kde A je skutečná plocha skládaného filtru [m^2] o rozměrech x a y .

2.3.4 Využití filtrů s nanovláknny

Dynamický rozvoj průmyslových odvětví, a s tím související neustále se zvyšující nároky na udržení čistoty ovzduší, vedou k hledání nových a efektivnějších filtračních materiálů. Čistý vzduch je potřeba přivádět do mnoha průmyslových procesů, ke spalovacím motorům nebo třeba do „čistých prostor“ laboratoří a nemocničních sálů, kde je velká náročnost na odfiltrování bakterií a jiných mikroorganismů a mikročastic. Zároveň je nutné čistit odpadní vzduch např. z jaderných elektráren.

Filtrační materiály z nanovláken najdou využití všude tam, kde jsou kladeny vysoké nároky na účinnost filtrace. Důvody pro použití nanovláken pro filtraci jsou v zásadě tři. Předně se jedná o velký měrný povrch vláken^{*}, na kterém jsou částice zachytávány. Druhým důvodem je malá velikost pórů, což zabraňuje částicím větším než je vzdálenost mezi vlákny proniknout nanovlákennou vrstvou. V poslední řadě jde o specifické okrajové podmínky toku filtrovaného média mezi nanovláknny [3,9].

^{*}) Pro příklad jeden gram vláken o průměru 0,1 μm má zhruba povrch 30 m^2 , zatímco jeden gram klasického vlákna o průměru 10 μm má plochu jen 0,3 m^2 .

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Hlavním cílem experimentální části této diplomové práce je ověřit možnosti výroby skládaných filtrů obsahujících nanovlákná. Jedná se tedy o dosažení maximální účinnosti skládaných filtrů při nízkém tlakovém spádu a porovnání měnících se filtračních vlastností v závislosti na různých hustotách skladů, tedy při různých účinných plochách filtrů.

Pro tento účel byly použity tři odlišné typy skládaných vrstev. První dvě vrstvy jsou tvořeny papírovým podkladem s polyamidovou nanovláknennou vrstvou připraveným společností Elmarco s.r.o. Z těchto vrstev se autorka snažila vytvořit skládané filtry o různé hustotě skladů, aniž by došlo k poškození nanovláknenné vrstvy. Obě vrstvy se lišily plošnou hmotností nanovláknenné vrstvy a některými detaily její výroby. Třetí vrstva je tvořena polypropylenovou podkladovou vrstvou typu spun-bond a polyuretanovou nanovláknennou vrstvou. Výška skladů se u jednotlivých typů skládaných filtrů nemění, je pro všechny testované vzorky konstantní, a to 0,02 m.

První typ skládaných filtrů:

Jako podkladový materiál je použit filtrační papír, na němž jsou technologií nanospider nanosená polyamidová nanovlákná (PA6) o plošné hmotnosti $0,6 \text{ g.m}^{-2}$. Při provádění experimentu se vychází nejprve z již zpracovaných výsledků, k nimž dospěl v rámci testování Ing. Jakub Hrůza, Ph.D., a které byly zveřejněny v jeho zprávě z 11. září 2006 určené pro společnost Elmarco s.r.o. jako dodavatele materiálu. Jedná se o čtyři vzorky skládaných filtrů odlišujících se pouze různou hustotou skladů. Na tento výzkum navazuje autorka zkoumáním dalších dvou vzorků vlastní výroby s ještě větší hustotou skladů.

Druhý typ skládaných filtrů:

Stejně jako u předcházejícího typu filtrů je jako podkladový materiál použit opět filtrační papír, ovšem s tím rozdílem, že plošná hmotnost polyamidových (PA6) nanovláken nanesených na papír je $0,14 \text{ g.m}^{-2}$. Při skládání filtrů z tohoto materiálu bylo zjištěno, že vzniklé vzorky měly horší adhezi nanovláknenné vrstvy na papírovém podkladu než vzorky prvního typu. Důvodem horší adheze jsou dle sdělení dodavatele materiálu jiné parametry výrobního postupu během zvlákňování na nanospideru. Jednotlivé vzorky filtrů nebylo možné vyskládat, aniž by procesem skládání nedošlo k porušení nanovláknenné vrstvy. Pro provádění experimentu byly přesto zhotoveny a podrobeny testu čtyři vzorky s nanesenou nanovláknennou vrstvou.

Třetí typ skládaných filtrů:

Pro třetí sadu skládaných filtrů již nebyl jako podklad použit filtrační papír, nýbrž netkaná textilie vyrobená technologií spun-bond (PP 20 g.m^{-2}), na kterou byla metodou elektrostatického zvlákňování nanesena polyuretanová nanovláknna (PU s obchodním názvem Laritane). Polyuretan byl zvlákňován dle předem připraveného roztoku následujícího složení uvedeného v tab. 2:

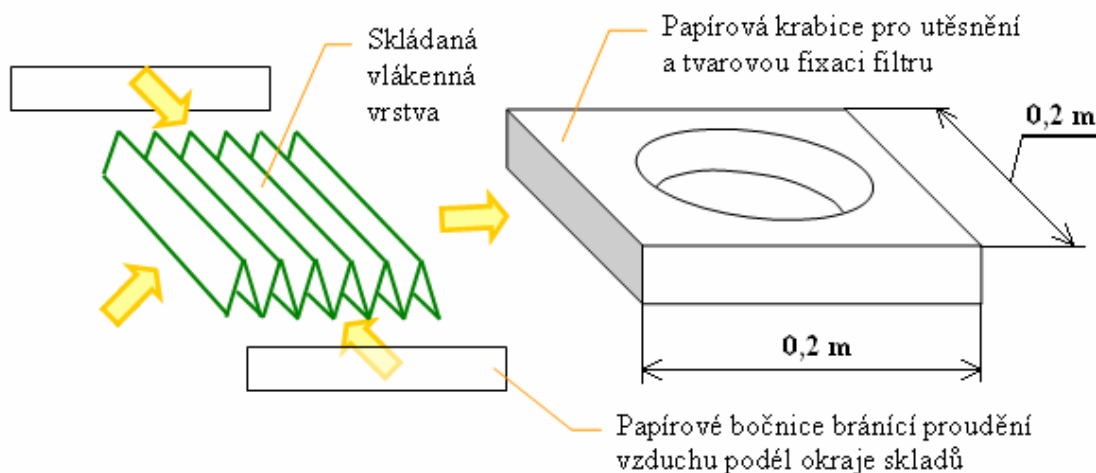
PU Laritane (30% základní roztok)	51,1 %
DMFA (dimethylformamid)	17,8 %
nasycený roztok TEAB (tetraethylamonium-bromid)	28,9 %
H ₂ O	2,2 %

Tab. 2: Procentuálně vyjádřené složení polyuretanového roztoku k výrobě nanovláken pomocí elektrostatického zvlákňování

Experimenty byly prováděny s pěti různými vzorky s odlišnou plošnou hmotností nanesených nanovláken. Byla porovnávána účinnost a tlakový spád plošných filtrů s účinností a tlakovým spádem skládaných filtrů.

3.1 Postup výroby skládaných filtrů

Výše zmíněné materiály byly ručně vyskládány do harmoniky s konstantní výškou skladů 0,02 m. Takto připravený vyskládaný materiál byl vložen do předem zhotoveného rámu z papírové krabice o rozměrech 0,2 m x 0,2 m s kruhovým otvorem o průměru 0,11 m (viz obr. 12). Rám slouží ke zpevnění vyskládané vrstvy. Boční strany rámu byly utěsněny pomocí vrstvy silikonu a zalepeny lepicí páskou, aby byla zajištěna tvarová fixace filtru, a aby nedocházelo k nežádoucímu úniku filtrované disperze mimo rám filtru.



Obr. 12: Princip přípravy vzorku skládaného filtru [9]

U třetí série vzorků bylo zapotřebí při zhotovování skládaných filtrů ještě dvou pomocných materiálů. Jednoho tužšího v podobě filtračního papíru, který byl použit jako podkladový materiál, jelikož samotnou vrstvu spun-bondu s nanovláknem nebylo jinak možné vyskládat, aby držela požadovaný tvar. Druhým pomocným materiálem byla další vrstva spun-bondu aplikovaná na nanovláknennou vrstvu z důvodu zabránění stírání této vrstvy během procesu skládání. Výroba vzorků pro třetí sérii byla velmi technicky i časově náročná.

Na níže uvedených obr. 13 a 14 je možné zhlédnout fotografie již vyrobeného vzorku.



Obr. 14: Ukázka hotového skládaného filtru (pohled shora)



Obr. 13: Boční pohled na hotový skládaný filtr s nanosenými nanovlákný

Všechny takto zhotovené vzorky skládaných filtrů byly podrobeny testování pomocí aerosolu NaCl na zařízení Bench Mounting Rig type 1100 P. Testováním vzorků bylo zjišťováno, jak hustota skladů ovlivňuje tlakový spád filtru a efektivitu zachytu částic.

3.2 Testování skládaných filtrů pomocí aerosolu NaCl

Pro testování skládaných filtrů pomocí aerosolu* NaCl bylo použito zařízení Bench Mounting Rig type 1100 P, jenž měří odlučivost částic menších než 2 μm v [%], tlakový spád v [Pa] a průtok vzduchu pronikajícího testovaným filtrem v [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$] při konstantní náletové rychlosti částic $0,083 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Test je prováděn podle Britské normy BS 4400 zvané „Method for Sodium Chloride Particulate Test for Respirator Filters“. Zařízení je určeno zejména pro jemné a vysoce účinné filtry, například HEPA filtry [10].

Přístroj Bench Mounting Rig type 1100 P na testování vzduchové filtrace je možné vidět na fotografii znázorněné na obr. 15.

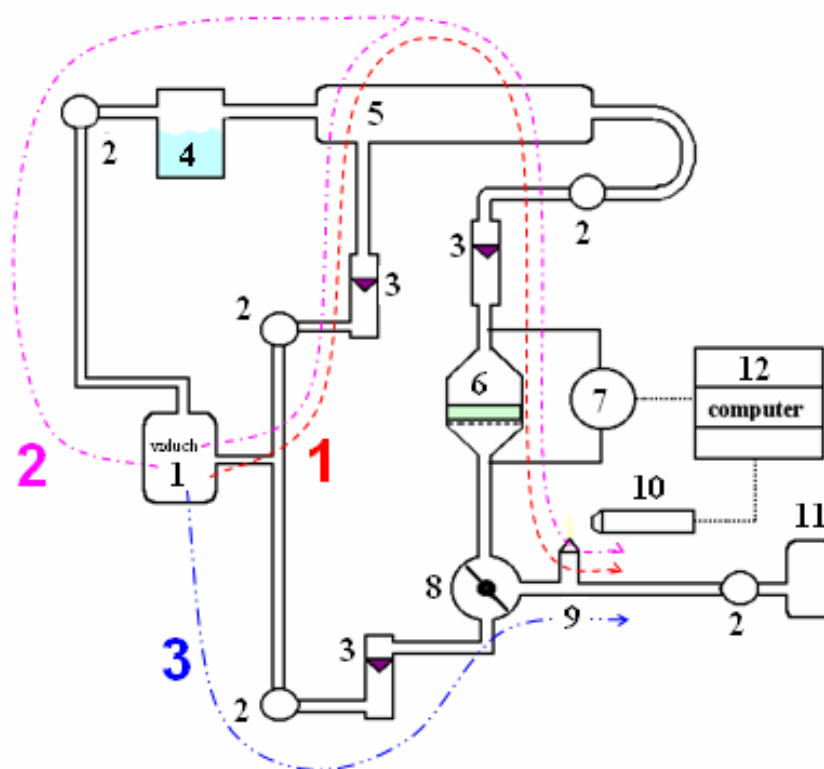


Obr. 15: Přístroj Bench Mounting Rig type 1100 P na testování vzduchové filtrace aerosolem NaCl [10]

*) Aerosol je heterogenní směs malých pevných nebo kapalných částic v plynu. Rozptýlené částice mají velikost od 10 nm do 100 μm , což odpovídá shlukům několika molekul až částicím tak hmotným, že už nemohou snadno poletovat v atmosféře.

3.2.1 Princip měření vzduchové filtrace aerosolem NaCl

Schéma zobrazené na obr. 16 představuje celý průběh měření vzduchové filtrace.



Obr. 16: Schéma principu zařízení pro testování vzduchové filtrace pomocí aerosolu NaCl [4];

Legenda: 1 – přívod stlačeného vzduchu,
2 – regulační ventil,
3 – průtokoměr,
4 – rozprašovač,
5 – vypařovací trubice,
6 – měřící cela se vzorkem filtru,
7 – měření tlakového spádu,
8 – přepínací ventil,
9 – hořák,
10 – spektrofotometr,
11 – láhev se stlačeným vodíkem,
12 – počítač.

Roztok 10% NaCl je nejprve rozprášen a zbaven vody ve vypařovací trubici (5). Výsledkem jsou částice soli o disperzitě do 2 μm , s mediánem 0,65 μm . Tyto částice nalétávají rychlostí 0,083 m.s^{-1} na testovaný vzorek (6) při průtoku vzduchu vzorkem 50 l.min^{-1} a zároveň je snímán tlakový spád vzorku.

Součástí zařízení je hořák (9), v němž hoří modrý plamen směsi vodíku a vzduchu. Projdou-li testovaným filtrem částice NaCl, obarví plamen do žluta. Čím více částic filtrem projde, tím větší bude intenzita žluté barvy plamene, která je snímána spektrofotometrem (10). Výstupem je hodnota napětí v mV . Podíl napětí naměřeného na testovaném vzorku a maximálního napětí na tzv. 100% vzorku udává hodnotu průniku P částic testovaným vzorkem určenou vztahem:

$$P = \frac{U_1}{U_2} \quad [\%] \quad (3.1),$$

kde U_1 je napětí naměřené na testovaném vzorku, U_2 je maximální napětí naměřené na tzv. 100% vzorku, kdy v měřicí cele (6) není upnut žádný vzorek.

Pro přesné měření je nutné určit nulový stav přístroje, a to tak, když v hořáku (9) hoří pouze vodík a vzduch přicházející cestou 1. Vzduch může v přístroji procházet v zásadě třemi cestami.

První cesta slouží pro určení nulového stavu přístroje a pro výměnu testovaného filtru – vzduch neprochází filtrem.

Druhá cesta určuje tlakový spád testovaného filtru a používá se pro vyčištění přístroje – vzduch prochází filtrem, ale neobsahuje částice soli.

Třetí cesta měří průnik částic filtrem – vzduch prochází filtrem i s částicemi aerosolu[4].

4. ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

Hodnoty účinné plochy pro skládané filtry uvedené v následujících tab. 3 - 5 jsou vypočítány dle výše uvedeného vztahu 2.8 (viz kapitola 2.3.3). U plošných filtrů porovnávaných se skládanými filtry u první a třetí sady vzorků je účinná filtrační plocha $0,01 \text{ m}^2$.

4.1 Výsledky měření první sady vzorků

První sada vzorků testovaných skládaných filtrů je vyrobena z filtračního papíru s nanesenými polyamidovými nanovlákný. V tab. 3 jsou porovnány výsledky měření všech šesti vzorků skládaných filtrů s nanovláknennou vrstvou a dvou vzorků plošných filtrů – jednoho s nanovlákný a druhého bez nanovláken.

Typ vzorku filtru	Počet skladů [m^{-1}]	Účinná plocha filtru [m^2]	Průnik částic [%]	Účinnost (efektivita) filtru [%]	Tlakový spád [Pa]
bez nanovláken – plošný	0	0,01	70,00	30,00	107
s nanovlákný – plošný	0	0,01	10,90	89,10	210
A – skládaný	25	0,0566	9,00	91,00	59
B – skládaný	50	0,0894	7,51	92,49	30
C – skládaný	100	0,1649	6,13	93,87	24
D – skládaný	150	0,2433	6,75	93,25	15
E – skládaný	175	0,2828	6,56	93,44	8
F – skládaný	200	0,3225	5,84	94,16	8

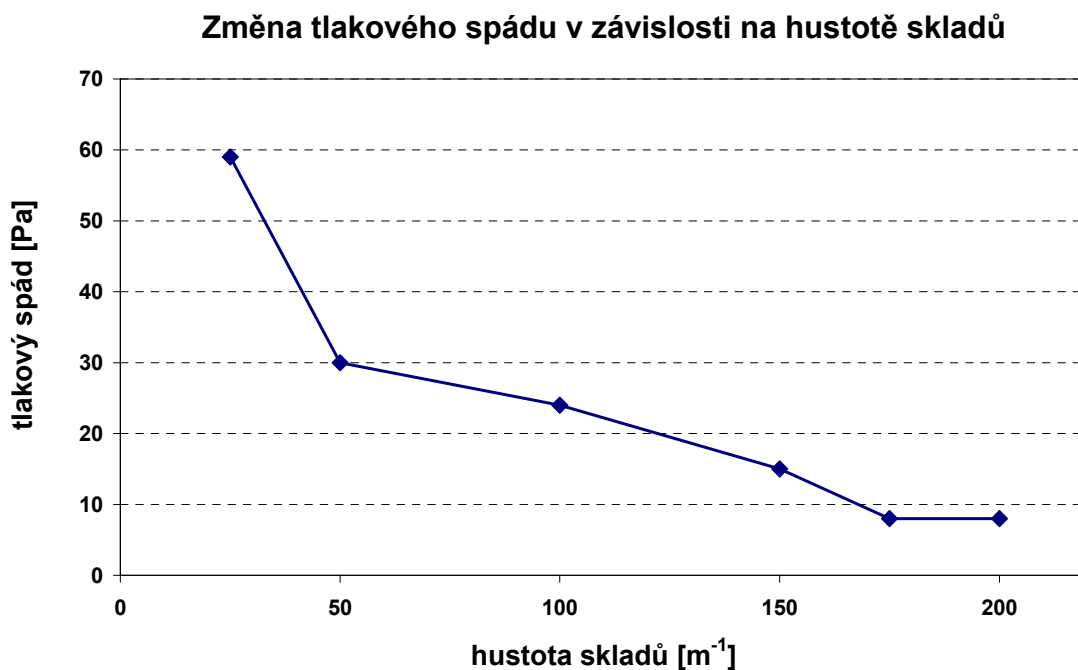
Tab. 3: Výsledky měření první sady vzorků

Příklad výpočtu účinné plochy pro vzorek A* podle vztahu 2.8:

$$A = y \cdot n \sqrt{4h^2 + \frac{x^2}{n^2}} = 0,2 \cdot 5 \sqrt{4 \cdot 0,02^2 + \frac{0,2^2}{5^2}} = \sqrt{0,0032} = \underline{\underline{0,0566 \text{ [m}^2\text{]}}} \quad (3.2),$$

kde rozměry hotového vzorku filtru x a y jsou 0,2 m, skladů ve vyrobeném vzorku n je 5** a výška skladů h je 0,02 m

Na základě hodnot uvedených v tab. 3 byly zhotoveny grafy (viz obr. 17 - 20) znázorňující závislosti tlakového spádu a efektivity skládaných filtrů na hustotě skladů a účinné filtrační ploše.

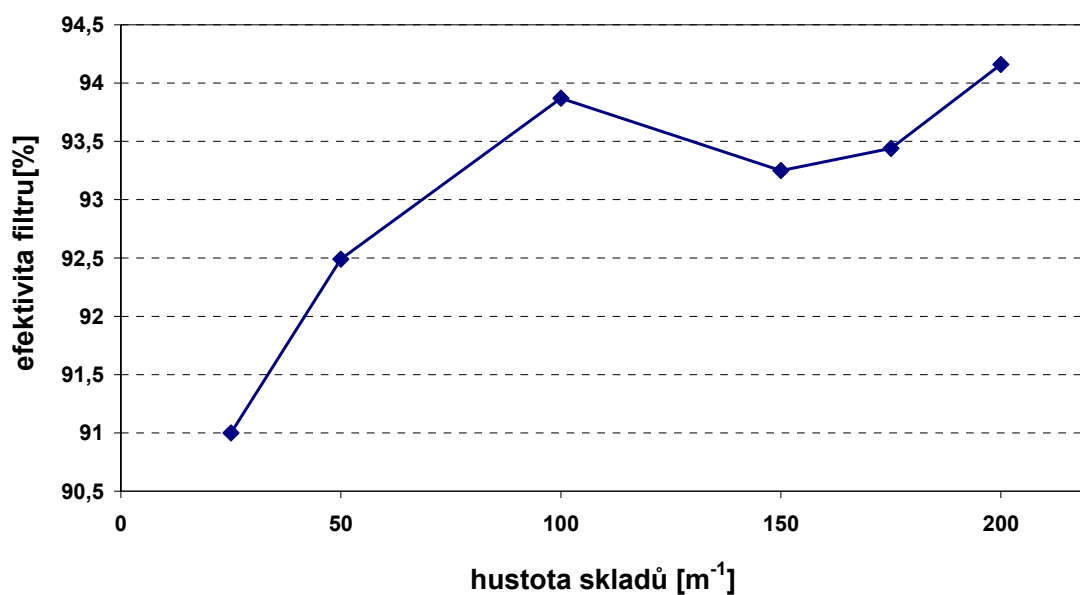


Obr. 17: Grafické znázornění změny tlakového spádu v závislosti na hustotě skladů filtru

*) Účinná plocha všech vzorků je vypočítána pro skutečné rozměry zhotoveného vzorku, čili 0,2m x 0,2m.

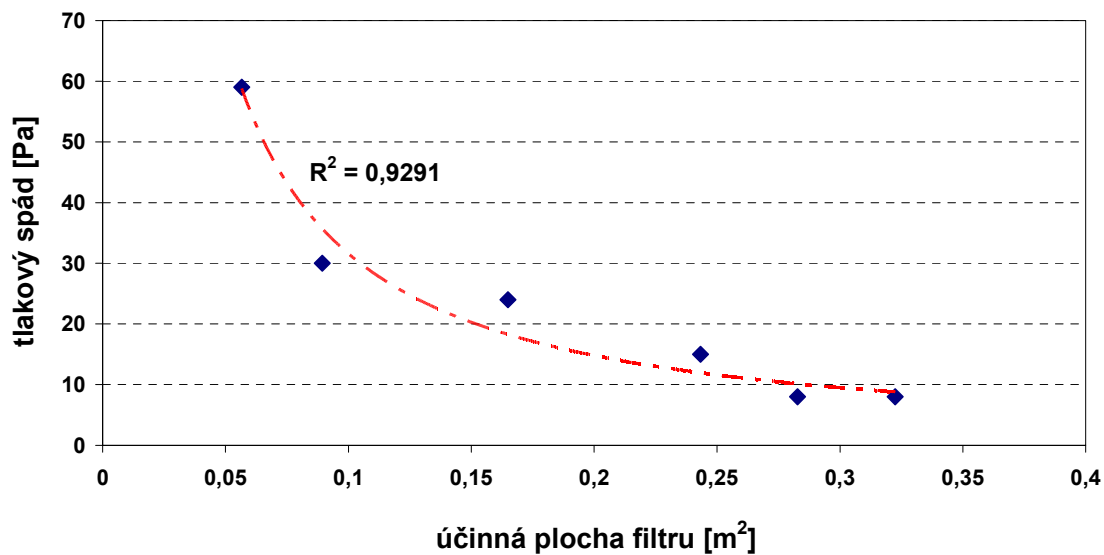
**) Ve vztahu 3.2 již není počet skladů n vztážen na 1 m délky filtru, ale je přepočten pro skutečné rozměry vzorku.

Změna efektivity v závislosti na hustotě skladů

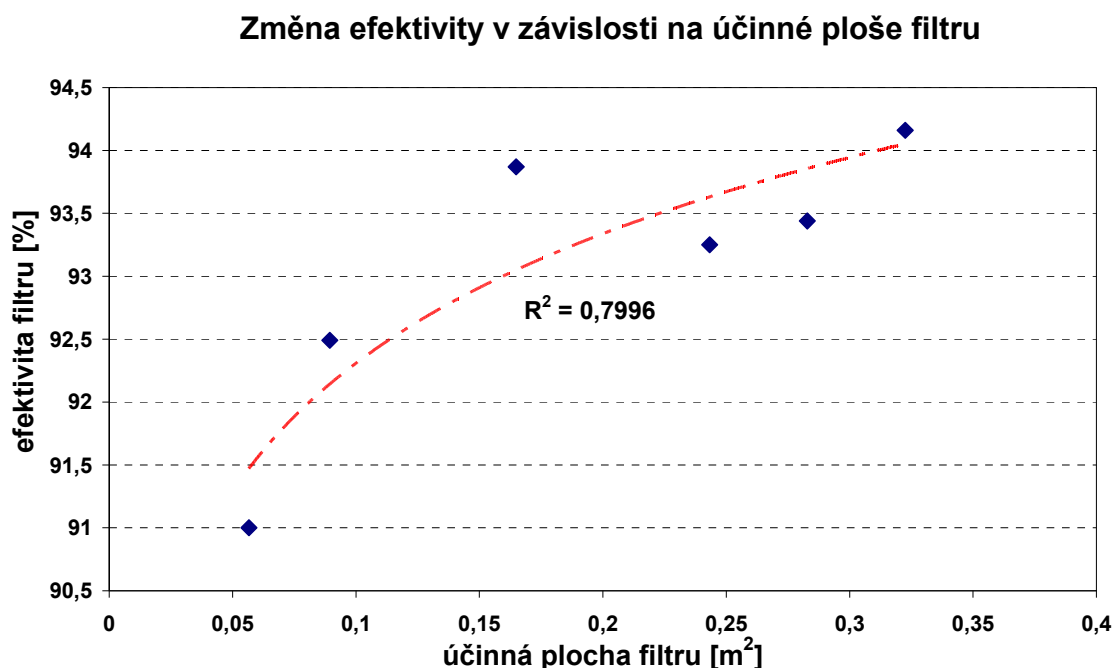


Obr. 18: Grafické znázornění změny efektivity filtru v závislosti na hustotě (počtu) skladů

Změna tlakového spádu v závislosti na účinné ploše filtru



Obr. 19: Grafické znázornění závislosti tlakového spádu na účinné ploše filtru (data jsou proložena křivkou s udáním koeficientu spolehlivosti)



***Obr. 20:** Grafické znázornění závislosti efektivity na účinné ploše filtru (data jsou proložena křivkou s udáním koeficientu spolehlivosti)*

Shrnutí výsledků:

Z výsledků uvedených ve výše zobrazené tab. 3 a grafech na obr. 17 - 20 je patrné že, se zvyšující se hustotou skladů filtru roste efektivita filtru a zároveň klesá tlakový spád. U vzorku F s počtem skladů 200 m^{-1} , bylo dosaženo efektivity skládaného filtru až 94,16 % a velmi nízkého tlakového spádu 8 Pa, což lze považovat za vysoce účinný filtr neboli HEPA filtr.

Stojí jistě za povšimnutí, že tlakový spád se zvyšujícím se počtem skladů neustále klesá, zatímco hodnoty účinnosti filtru při počtu skladů v rozmezí $100 - 200 \text{ m}^{-1}$ nestoupají předpokládaným způsobem, nýbrž občas nepatrně klesají. Bylo by proto jistě dobré provést podrobnější měření pro objasnění výkyvů hodnot v tomto rozmezí. Také by mohlo být přínosné pokračovat v testování dalších vzorků o větších hustotách skladů, a zjistit tak, zda je možné docílit ještě vyšší účinnosti skládaných filtrů při co nejnižším tlakovém spádu, aniž by nedošlo k příliš velkému poklesu koeficientu propustnosti filtru.

4.2 Výsledky měření druhé sady vzorků

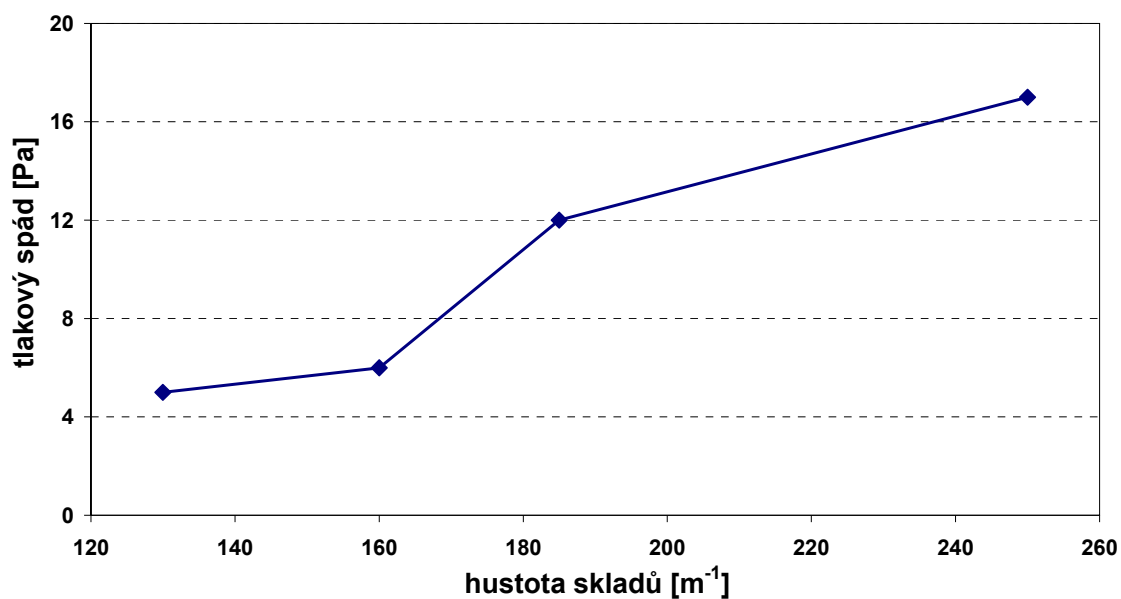
Pro testování byly opět použity vzorky tvořené podkladem z filtračního papíru s polyamidovými nanovlákný (PA6), lišící se od vzorků první sady pouze jinou plošnou hmotností nanosené nanovláknenné vrstvy.

Typ vzorku filtru	Počet skladů [m ⁻¹]	Účinná plocha filtru [m ²]	Průnik částic [%]	Účinnost filtru [%]	Tlakový spád [Pa]
bez nano – skládaný	145	0,2354	89	11	8
A – skládaný	130	0,2118	85	15	5
B – skládaný	160	0,2591	82	18	6
C – skládaný	185	0,2987	78	22	12
D – skládaný	250	0,4019	65	35	17

Tab. 4: Výsledky měření druhé sady vzorků

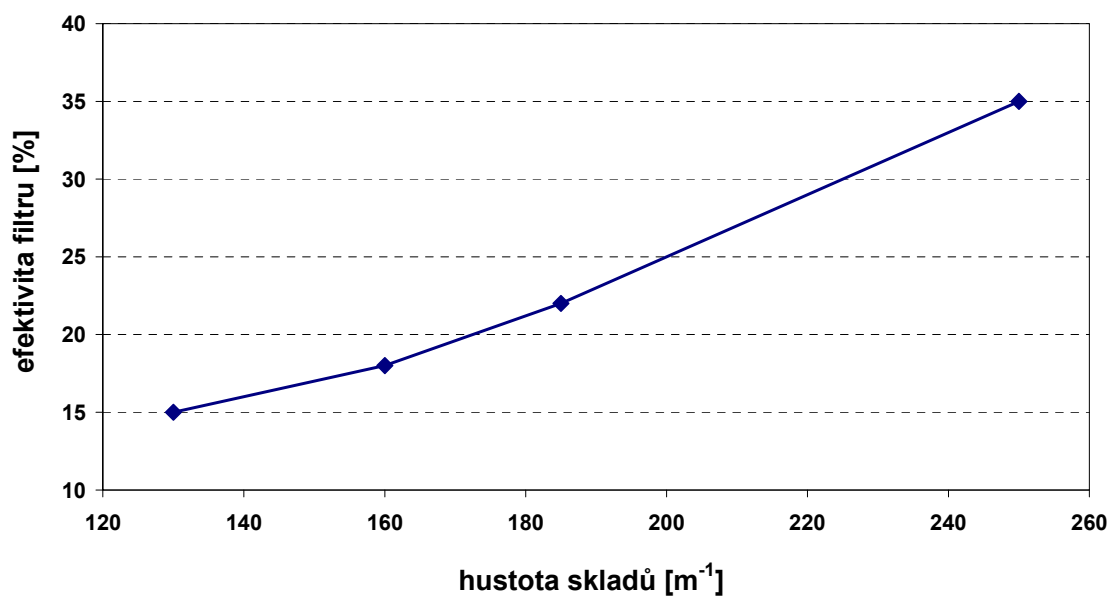
Na základě hodnot uvedených v tab. 4 byly zhotoveny grafy uvedené na obr. 21 - 24 znázorňující závislosti tlakového spádu a efektivity skládaných filtrů na hustotě skladů a účinné filtrační ploše.

Změna tlakového spádu v závislosti na hustotě skladů



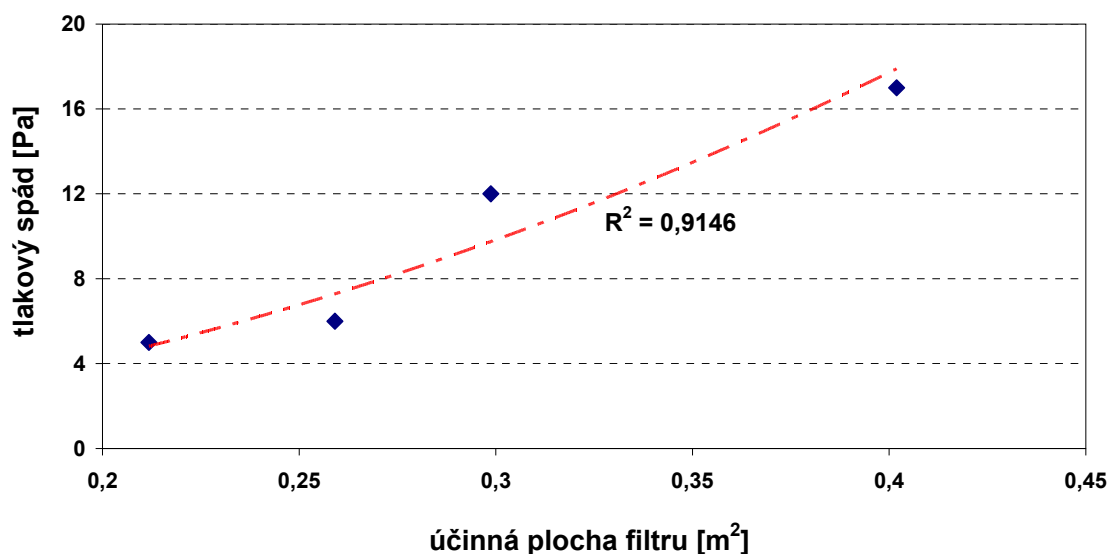
Obr. 21: Grafické znázornění změny tlakového spádu v závislosti na hustotě skladů filtru

Změna efektivity v závislosti na hustotě skladů



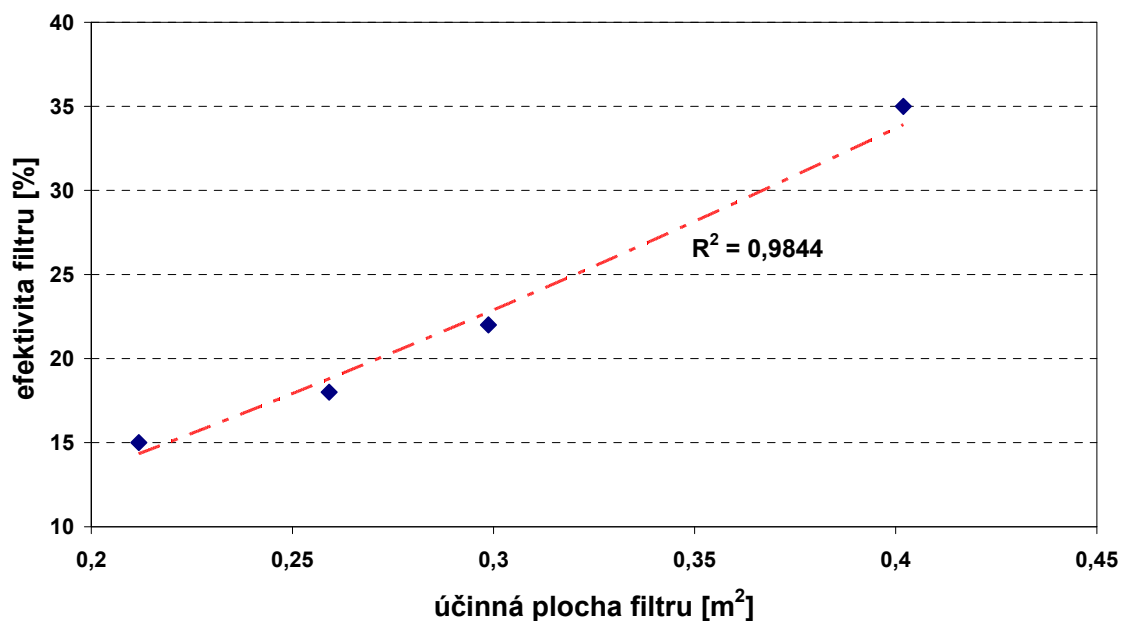
Obr. 22: Grafické znázornění změny efektivity filtru v závislosti na hustotě (počtu) skladů

Změna tlakového spádu v závislosti na účinné ploše filtru



Obr. 23: Grafické znázornění závislosti tlakového spádu na účinné ploše filtru (data jsou proložena křivkou s udáním koeficientu spolehlivosti)

Změna efektivity v závislosti na účinné ploše filtru



Obr. 24: Grafické znázornění závislosti efektivity na účinné ploše filtru (data jsou proložena křivkou s udáním koeficientu spolehlivosti)

Shrnutí výsledků:

Stejně jako u první sady vzorků má rostoucí počet skladů vliv na zvyšující se účinnost filtru, i když se nedaří dosáhnout efektivitu filtru ve výši 85 % dle evropské normy EN 1822. I při použití velmi vysokého počtu skladů (např. 250 m^{-1} u vzorku D) nebylo možné ani se přiblížit hodnotám účinnosti z první sady vzorků. Špatné výsledky filtrace byly způsobeny nekvalitním materiálem, z něhož se nedaly vyrobit vzorky skládaných filtrů, aniž by nedošlo k porušení nanosené polyamidové nanovlákněné vrstvy, jak již bylo rozebráno výše (viz kapitola 3).

Zvyšující se počet skladů má u této sady vzorků vliv také na zvýšení tlakového spádu, avšak jeho nárůst se pohybuje stále v nízkých hodnotách (v rozmezí 5 Pa až 17 Pa).

Účinnost zachytávání částic u skládaných filtrů s nanovlákněnou vrstvou není nijak rozdílná oproti vzorku skládaného filtru bez nánosu nanovlákněné vrstvy. Změny tlakového spádu a efektivitu jsou dány spíše mírou poškození nanovlákněné vrstvy, a proto se mohou měnit proti původním předpokladům.

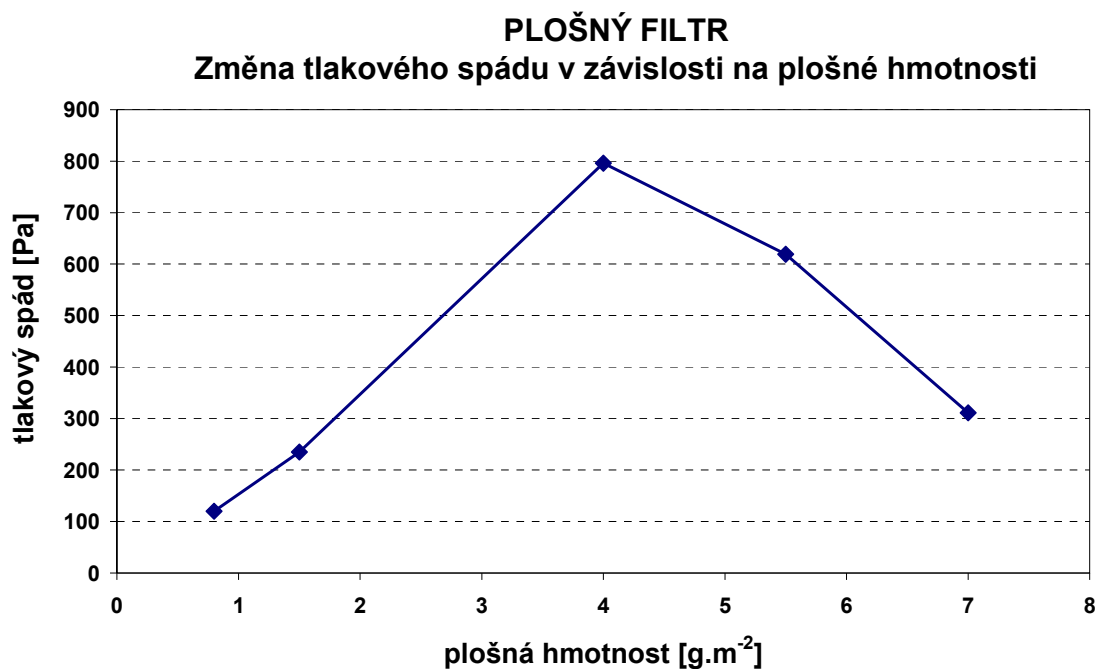
4.3 Výsledky měření třetí sady vzorků

Vzorky skládaných filtrů byly vytvořeny z netkané textilie vyrobené metodou spun-bond (PP 20 g.m⁻²), na níž byla zvlákněna polyuretanová nanovlákna (obchodní název Laritane) o různých plošných hmotnostech. Jelikož se u této sady vzorků příliš nelišila hustota skladů, tím pádem i účinná plocha jednotlivých skládaných filtrů, bylo měření založeno spíše na porovnání účinnosti a tlakového spádu na plošné hmotnosti vzorků. Získané výsledky u skládaných filtrů byly následně porovnány s výsledky filtrů plošných. Naměřené a vypočtené hodnoty ukazuje tab. 5.

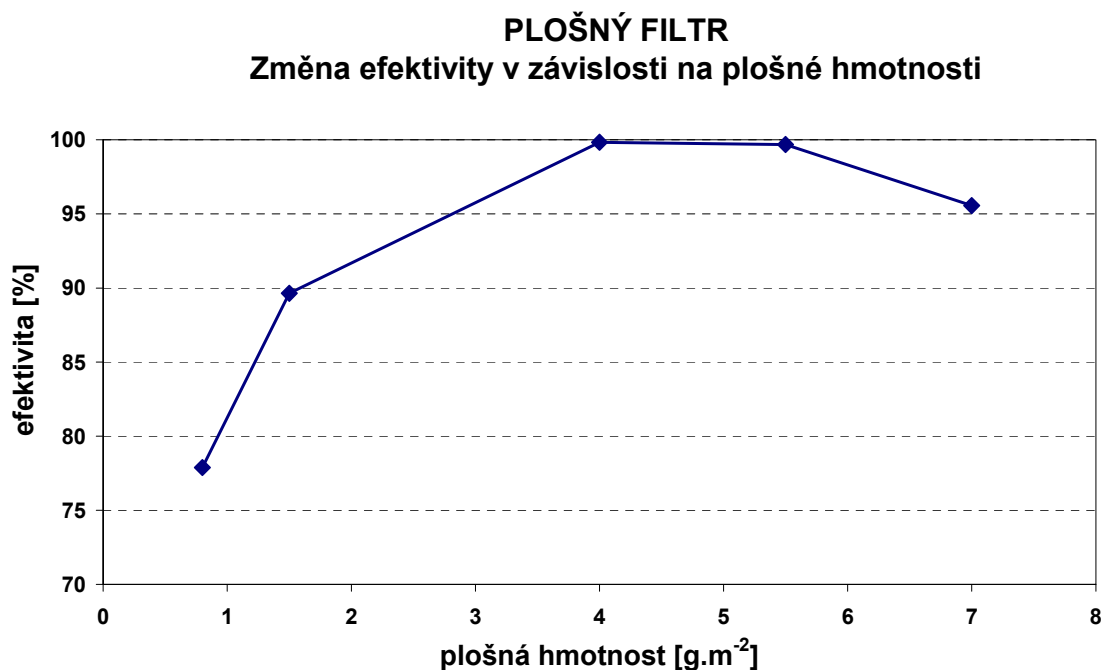
Typ vzorku filtru	Plošná hmotnost [g.m ⁻²]	Účinná plocha filtru [m ²]	Průnik částic [%]	Účinnost (efektivita) filtru [%]	Tlakový spád [Pa]
A – plošný	0,8	0,01	22,12	77,88	120
B – plošný	1,5	0,01	10,36	89,64	235
C – plošný	4	0,01	0,16	99,84	796
D – plošný	5,5	0,01	0,32	99,68	619
E – plošný	7	0,01	4,46	95,56	311
A – skládaný	0,8	0,1649	40,6	59,4	15
B – skládaný	1,5	0,1417	23,1	76,9	47
C – skládaný	4	0,1341	18,5	81,5	198
D – skládaný	5,5	0,1265	26,6	73,4	162
E – skládaný	7	0,1341	22,2	77,8	93

Tab. 5: Výsledky měření třetí sady vzorků

Na základě hodnot uvedených v tab. 5 byly zhotoveny grafy (viz obr. 25 - 28) znázorňující závislosti tlakového spádu a efektivitu plošných a skládaných filtrů na plošné hmotnosti nanosené polyuretanové nanovlákněné vrstvy.



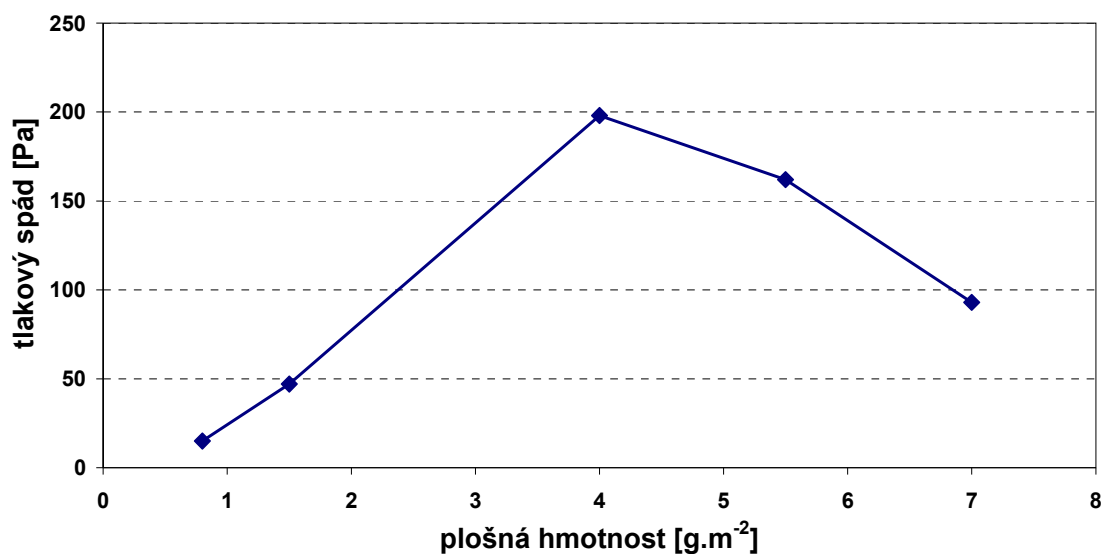
Obr. 25: Grafické znázornění změny tlakového spádu v závislosti na plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy u plošného filtru



Obr. 26: Grafické znázornění změny efektivity v závislosti na plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy u plošného filtru

SKLÁDANÝ FILTR

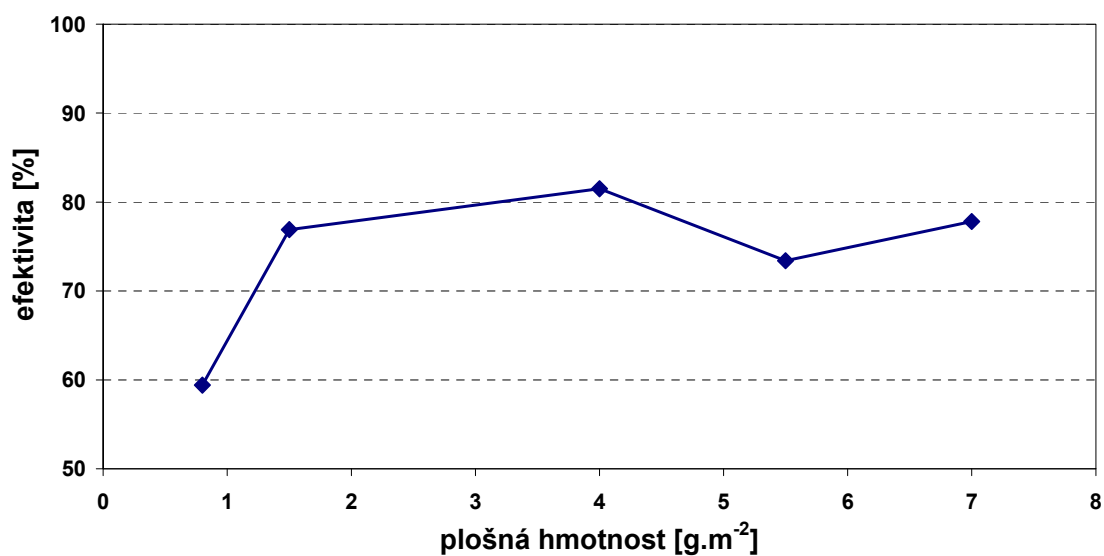
Změna tlakového spádu v závislosti na plošné hmotnosti



Obr. 27: Grafické znázornění změny tlakového spádu v závislosti na plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy u skládaného filtru

SKLÁDANÝ FILTR

Změna efektivity v závislosti na plošné hmotnosti



Obr. 28: Grafické znázornění změny efektivity v závislosti na plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy u skládaného filtru

Shrnutí výsledků:

Ve třetí sadě vzorků není počet skladů rozhodujícím parametrem ovlivňujícím účinnost filtru a tlakový spád, neboť rozsah počtu skladů u jednotlivých vzorků není příliš velký. Vyrobit materiál o vyšším počtu skladů bylo v tomto případě velmi náročné, jelikož podkladový materiál nebyl dostatečně tuhý pro konstrukci skládaného filtru jak bylo již rozebráno v kapitole 3.1.

Mnohem důležitějším faktorem je měnící se plošná hmotnost vzorků. Hodnoty neměřené u skládaných filtrů byly následně porovnány s parametry plošných (ještě nevyskládaných) filtrů. Nejlepších filtračních vlastností u plošných filtrů bylo dosaženo u vzorků s plošnou hmotností v rozmezí 4–7 g.m². Na základě porovnání plošných a skládaných filtrů lze obecně říci, že účinnost plošných filtrů dosahovala paradoxně lepších hodnot než u filtrů skládaných. Klesající účinnost u skládaných filtrů byla zřejmě způsobena vznikem drobných trhlin při konstrukci filtrů.

4.4 Doplnující experiment zabývající se vlivem vlhkosti na průměry vláken

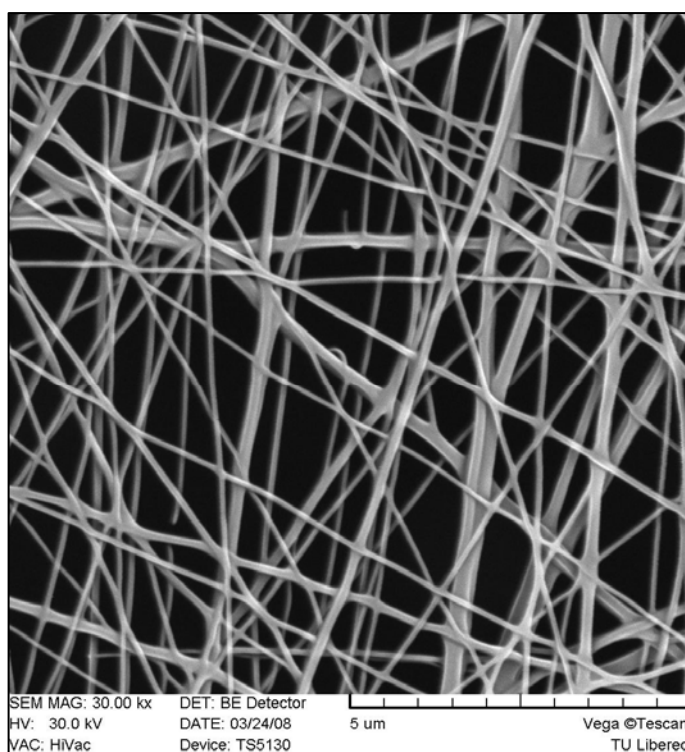
Doplnujícím experimentem bylo ověření teoretického předpokladu, že vyšší relativní vlhkost vzduchu během procesu elektrostatického zvlákňování má negativní vliv na výsledné vlastnosti vyrobeného materiálu používaného pro vzduchovou filtraci. Vychází se z hypotézy, že při vyšší relativní vlhkosti vzduchu se vyrobí vlákna o větším průměru, která mohou způsobit horší filtrační vlastnosti.

Porovnávány byly dva vzorky vyrobené metodou nanospider při stejných výrobních parametrech kromě relativní vlhkosti vzduchu a teploty uvnitř zařízení. Výrobní parametry obou vzorků jsou uvedeny v následující tab. 6.

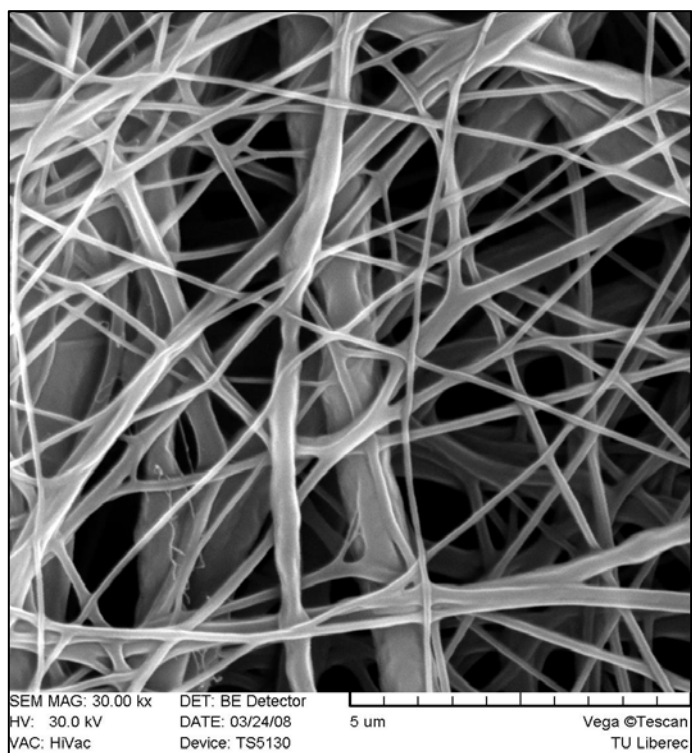
Parametry zařízení během výroby	Vzorek A	Vzorek B
Rychlost odvádění materiálu během zvlákňování v [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	0,1	0,1
Napětí U [kV]	79	79
Proud I [mA]	0,05	0,05
Vzdálenost elektrod d [mm]	175	175
Relativní vlhkost uvnitř zařízení φ [%]	18	30
Teplota uvnitř zařízení t [$^{\circ}\text{C}$]	20	25
Plošná hmotnost výsledné vrstvy m_s [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$]	2,5	3,5

Tab. 6: Výrobní parametry vzorku A a B při procesu elektrostatického zvlákňování

U zhotovených vzorků bylo provedeno měření průměrů vzniklých vláken pod elektronovým mikroskopem (viz obr. 29 a 30). U každého vzorku bylo proměřeno 20 náhodně vybraných vláken a statistickými výpočty byla získána data uvedená v tab. 7.



Obr. 29: Vzorek A pod elektronovým mikroskopem



Obr. 30: Vzorek B pod elektronovým mikroskopem

	Vzorek A	Vzorek B
Průměrná hodnota tloušťky vláken \bar{x} [μm]	0,12	0,26
Směrodatná odchylka σ [μm]	0,05	0,14
Nejmenší naměřená hodnota průměru vláken x_{\min} [μm]	0,06	0,09
Největší naměřená hodnota průměru vláken x_{\max} [μm]	0,20	0,61

Tab. 7: Porovnání hodnot průměru vláken vzorku A a vzorku B

Obě vyrobené vrstvy byly následně podrobeny testování filtračních vlastností pomocí aerosolu NaCl na zařízení Bench Mounting Rig type 1100 P, aby byla ověřena domněnka, že vrstva nanesených vláken o větším průměru má horší filtrační vlastnosti oproti vlákenným vrstvám s menšími průměry vláken.

Proměřovány byly pouze vzorky plošných filtrů, jelikož výrobou vzorků skládaných filtrů by mohlo dojít k porušení nanovlákněné vrstvy,

a tudíž zkusení výsledných hodnot jako v předchozím případě (viz kapitola 4.3). Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 8.

Typ vzorku filtru	Plošná hmotnost [g.m ⁻²]	Účinná plocha filtru [m ²]	Průnik částic [%]	Účinnost (efektivita) filtru [%]	Tlakový spád [Pa]
A – plošný	2,5	0,01	20,6	79,4	105
B – plošný	3,5	0,01	8,19	91,81	246

Tab. 8: Výsledky měření efektivy a tlakového spádu porovnávaných vzorků A a B

Shrnutí výsledků:

Experimentem bylo dokázáno, že vyšší relativní vlhkost vzduchu při výrobě vzorku B způsobila dvojnásobné zvětšení průměru vláken a zároveň vyšší hodnotu plošné hmotnosti vzniklé polyuretanové nanovlákněné vrstvy. I přes zvětšení průměrů vláken se nejednalo o natolik velký nárůst, aby došlo ke zhoršení filtračních vlastností. Naopak takto vyrobená nanovlákněná vrstva byla rovnoměrnější, což způsobilo lepší hodnotu efektivy filtru oproti účinnosti filtru, který představoval vzorek A.

Ovšem na druhé straně vyšší plošná hmotnost vzorku B způsobila větší hodnotu tlakového spádu během filtrace.

5. ZÁVĚR

Hlavním cílem prováděných experimentů v rámci diplomové práce bylo získat skládaný filtr s maximální účinností při relativně nízkém tlakovém spádu. Za tímto účelem byly připraveny tři série vzorků filtračních textilií lišících se způsobem skládání, typem použitého podkladového materiálu a nanesené nanovlákněné vrstvy. Zhotovené vzorky byly následně testovány a podrobeny sledování změn jejich filtračních vlastností v závislosti na různých vstupních parametrech.

Z experimentů není možné odvodit obecné závěry platící pro všechny tři série vzorků, neboť dosažené výsledky byly u každé sady jiné.

Výsledky testování první sady vzorků umožňují učinit závěr, že se zvyšující se hustotou skladů filtru roste efektivita filtru a zároveň klesá tlakový spád. U vyrobených vzorků byla naměřena efektivita až 94,16 % a velmi nízký tlakový spád 8 Pa. Tím se podařilo vytvořit vysoce účinný filtr, který je možné podle evropské normy EN 1822 považovat za HEPA filtr. Autorka i přesto doporučuje provést podrobnější měření pro objasnění výkyvů hodnot efektivy filtrů v rozmezí hustoty skladů $100 - 200 \text{ m}^{-1}$. Také by mohlo být přínosné pokračovat v testování dalších vzorků o větším počtu skladů, a zjistit tak, zda je možné docílit ještě vyšší efektivy skládaných filtrů, aniž by došlo k nárůstu tlakového spádu.

Zkoumání druhé sady vzorků ukázalo, že stejně jako v předchozím případě má rostoucí počet skladů vliv na zvyšující se účinnost filtru. Odlišně od první sady vzorků není však dosahováno výrazných hodnot účinnosti, aby se dalo hovořit o HEPA filtrech. Není jistě bez zajímavosti, že při zvyšující se účinnosti způsobené větším počtem skladů stoupal zároveň i tlakový spád. Nicméně nárůst jeho hodnot byl značně malý.

Rozhodujícím parametrem při zkoumání třetí sady vzorků nebyla hustota skladů, nýbrž plošná hmotnost polyuretanové nanovlákněné

vrstvy. Hlavní částí zkoumání bylo porovnávání filtračních vlastností plošných a skládaných filtrů. Vycházelo se z předpokladu, že filtrační vlastnosti dosažené u plošných filtrů nemohou dosahovat tak vysokých hodnot jako u skládaných filtrů. Tento předpoklad nebyl překvapivě potvrzen, protože lepších hodnot efektivity bylo dosaženo právě u plošných filtrů. Na druhou stranu u skládaných filtrů se hodnoty tlakových spádů jeví příznivější než u vzorků plošných filtrů, kde byly jeho hodnoty příliš vysoké. Zde je autorkou doporučováno zvláknovat polyuretanovou nanovláknennou vrstvu na jiný a tužší podkladový materiál než byl materiál typu spun-bond. Tím bude vyřešen technický problém týkající se skládání této vrstvy a odstranil by se tak případný vznik trhlin v nanesené vrstvě.

Prameny a literatura

- [1] Vymezení základních pojmů. Dostupné z:
<http://www.elmarco.com/index.php?lang=2>
- [2] Jirsák, O., Lukáš, D. a kol. Výroba a vlastnosti nanovláken. Dostupné z:
<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/ntt/nanoact.ppt#24>
- [3] Metoda nanospider a použití nanovláken. Dostupné z:
<http://www.nanospider.cz/?lang=en&kategorie=&id>
- [4] Hrůza, J.: Přednáška Filtrace a filtrační materiály. Dostupné z:
<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/filtr.pdf>
- [5] Hrůza, J.: Přednáška Filtration part 1. Dostupné z:
<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/tpa/filtration1.ppt>
- [6] Hrůza, J.: Přednáška Filtration part 2. Dostupné z:
<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/tpa/filtration2.ppt>
- [7] HEPA filtry. Dostupné z:
<http://www.avair.cz/hepa-filtr-a-jeho-vyhody.php>
- [8] Brown, R. C. : Air filtration, Sheffield UK, 1993
- [9] Hrůza, J.: Zlepšování filtračních vlastností vlákenných materiálů. Technická Univerzita v Liberci, Liberec 2005
- [10] Testování filtrů aerosolem NaCl. Dostupné z:
http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/nove/index.php?obsah=vedecka_cinnost/vzduchova_filtrace
- [11] Pich, J.: Teorie filtrace aerosolů vláknitými a membránovými filtry. Disertační práce ČSAV, Institut fyzikální chemie, Praha 1964

Seznam příloh

Příloha č. 1) tab. 1: Elektrostaticky zvláknitelné polymerní roztoky
tab. 2: Elektrostaticky zvláknitelné polymery z taveniny

Příloha č.1:

Polymer	Rozpouštědlo	Aplikace
Nylon 6.6, PA 6.6	Kyselina mravenčí	Ochranné oblečení
Polyuretan, PU	Dimethylformamid (DMFA)	Ochranné oblečení, elektrizované filtry
Polybenzimidazol, PBI	Dimethylacetamid (DMAA)	Ochranné oblečení, nanovláknenné kompozity
Polykarbonát, PC	DMFA : tetrahydrofuran (1:1)	Ochranné oblečení, elektrizované filtry
	Dichlormethan	Senzory, filtry
	Chloroform, tetrahydrofuran	
Polyakrylonitril, PAN	Dimethylformamid	Karbonová nanovláknna
Polyvinylalkohol, PVA	Destilovaná voda	
Polylaktidacid, PLA	Dimethylformamid	
	Methylenchlorid a dimethylformamid	
	Dichlormethan	Senzory, filtry, v medicíně
Polyetylen-ko-vinyl acetát, PEVA		V medicíně
PEVA/PLA		V medicíně
Polymetakrylát, (PMMA) /tetrahydroperfluoro-oktylakrylát (TAN)	DMFA : toluen (1:9)	

Polymer	Rozpouštědlo	Aplikace
Polyethylen oxid, PEO	Destilovaná voda	
	Destilovaná voda a ethanol nebo NaCl	
	Destilovaná voda, destilovaná voda a chloroform, destilovaná voda a isopropanol	
	Destilovaná voda:ethanol (3:2)	
	Destilovaná voda, chloroform, aceton	
	Ethanol	
	Isopropylalkohol + voda	Elektrizované filtry
	Isopropanol:voda (6:1)	
	Chloroform	
Kolagen-PEO	Kyselina chlorovodíková	Léčení ran, tkáňové inženýrství, prostředky zastavující krvácení
	Kyselina chlorovodíková (pH = 2,0)	Léčení ran, tkáňové inženýrství
Polyanilin (PANI) /PEO směsi	Chloroform	Vodivá vlákna
	Kyselina kafrsulfonilová	Vodivá vlákna
Polyanilin (PANI) /Polystyren (PS)	Chloroform	Vodivá vlákna
	Kyselina kafrsulfonilová	Vodivá vlákna

Polymer	Rozpouštědlo	Aplikace
Hedvábí-jako polymer s funkčním fibronektinem	Kyselina mravenčí	Implantáty
Polyvinylkarbazol	Dichlormethan	Senzory, filtry
Polyethylentereftalát, PET	Dichlormethan a kys. trifluoroacetová	
	Dichlormethan:kys. trifluoroacetová (1:1)	
Kyselina polyakrylová - polypyren methanol, PAA - PM	Dimethylformamid	Optické senzory
Polystyren, PS	Tetrahydrofuran, dimethylformamid, CS ₂ (karbon disulfid), toluen	
	Methylethylketon	Enzymatické biotransformace
	Chloroform, dimethylformamid	
	Dimethylformamid	Ploché pásky
	Tetrahydrofuran	Katalyzátory, filtry
Polymethakrylát, PMMA	Tetrahydrofuran, aceton, chloroform	
Polyamid, PA	Dimethylacetamid	Skleněná vlákna pro filtrační prostředky
Směs hedvábí/PEO	Hedvábný vodný roztok	Biomateriálové konstrukce
Polyvinylfenol, PVP	Tetrahydrofuran	Antimikrobiální prostředky

Polymer	Rozpouštědlo	Aplikace
Polyvinylchlorid, PVC	Tetrahydrofuran/ dimethylformamid (1:1) 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80, 0/100 (obj.%)	
Acetát celulozy, CA	Aceton, kyselina octová, DMAA	Membrány
Směs PAA - PM (kys. polyakrylová - poly (pyrene methanol)) a polypolyuretan	Dimethylformamid	Optické senzory
Polyvinylalkohol (PVA)/oxid křemičitý	Destilovaná voda	
Polyakrylamid, PAAm		
PLGA	Tetrahydrofuran : dimethylformamid (1:1)	Konstrukce pro tkáňové inženýrství
Kolagen	Hexafluoro-2-propanol	Konstrukce pro tkáňové inženýrství
Polykaprolakton, PCL	Chloroform:methanol (3:1), toluen:methanol (1:1), dichlormethan:methanol (3:1)	
Poly (2-hydroxyethyl- methakrylát), HEMA	Ethanol:kyselina mravenčí (1:1)	Ploché pásky
Poly (vinyliden fluoride), PVDF	DMFA : DMAA (1:1)	Ploché pásky
Polyetherimid, PEI	Hexafluoro-2-propanol	Ploché pásky

Polymer	Rozpouštědlo	Aplikace
Polyethylenglykol, PEG	Chloroform	
Nylon 4.6, PA - 4.6	Kyselina mravenčí	Propustné kompozity
Poly (ferocenyldimethylsilan), PFDMS	Tetrahydrofuran : DMFA (9:1)	
Nylon 6 (PA6)/montmorillonit (Mt)	Hexa-fluoroisopropanol (HFIP)	
	HFIP/dimethylformamid: 95/5 (hm.%)	
Poly (ethylen-ko-vinyl alkohol), PEVA	Isopropanol/voda: 70/30 (obj.%)	Biomedicína
Polyakrylonitril (PAN)/TiO ₂		Fotovoltaické a vodivé polymery
Polykaprolakton (PCL) /kovy: zlato, ZnO, kov		ZnO: využití v kosmetice
Polyvinylpyrolidon, PVP		
Polymetha-fenylen isoftalamid		

Tab. č. 1: Elektrostaticky zvláknitelné polymerní roztoky [2]

Polymer	Výrobní teplota [°C]
Polyethylen, PE	200 - 220
Polypropylen, PP	220 - 240
Nylon 12, PA-12	220
Polyethylentereftalát, PET	270
Polyethylennaftalát, PEN	290
Směs PET/PEN	290

Tab. č. 2: Elektrostaticky zvláknitelné polymery z taveniny [2]